

## **TUGAS AKHIR**

### **PENGARUH RENDAMAN AIR LAUT TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK DENGAN PERKUATAN GFRP AKIBAT BEBAN FATIK**



**DISUSUN OLEH :**

**WILLIAM**

**D 111 10 009**

**JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2014**



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

KAMPUS TAMALANREA TELP. (0411) 587 636 FAX. (0411) 580 505 MAKASSAR 90245  
E-mail : sipil.unhas@yahoo.co.id

**LEMBAR PENGESAHAN**

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Judul : " *Pengaruh Rendaman Air Laut Terhadap Kapasitas Lentur Balok Dengan Perkuatan GFRP Akibat Beban Fatik.* "

Disusun Oleh :

Nama : William

D111 10 009

Telah diperiksa dan disetujui  
Oleh Dosen Pembimbing

Makassar, 27 April 2015

Pembimbing I

Dr. Rudy Djamaluddin, ST. M. Eng  
Nip. 19701108 199412 1001

Pembimbing II

Ir. Abd. Madjid Akkas, MT.  
Nip. 19490910 1983 1 003

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Sipil,

Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT  
Nip. 19601231 198609 1 001

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala berkah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Pengaruh Rendaman Air Laut Terhadap Kapasitas Lentur Balok Dengan Perkuatan GFRP Akibat Beban Fatik”**, sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa selesainya tugas akhir ini berkat bantuan dari berbagai pihak, utamanya dosen pembimbing :

Pembimbing I : Dr. Rudi Djamaluddin, ST.M.Eng

Pembimbing II : Ir. H. Abdul Madjid Akkas, M.T

Dengan segala kerendahan hati, penulis juga ingin menyampaikan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Ayahanda dan Ibunda tercinta atas kasih sayang, pengorbanan dan doanya.
2. Bapak Dr. Ing Ir. Wahyu H. Piarah, MS, ME., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT., selaku ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Dr. Rudi Djamaluddin, ST.M.Eng. selaku kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

5. Bapak Arbain Tata, ST. MT., selaku mahasiswa S3 yang telah banyak meluangkan waktu dan tenaga untuk bimbingan dan pengarahan dalam penelitian ini.
6. Pak Jamal, ST. selaku Mahasiswa S2 , Bapak Sudirman Sitang, ST., selaku staf Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan pengarahan selama pelaksanaan penelitian di Laboratorium.
7. Seluruh dosen, staf dan karyawan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Ilyona Risty yang senantiasa memberikan semangat, dorongan dan doa.
9. Rekan-rekan mahasiswa angkatan 2010 Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan. Serta adik-adik angkatan 2012 dan 2013 Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang membantu dan mendukung dalam penyelesaian tugas akhir ini.
10. Teman-teman satu penelitian Pak Jamal, Kak Robby, Kak Irma, Ivan Rngan dan Rakha.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini tidak luput dari kekurangan-kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kepada para pembaca, kiranya dapat memberikan sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan Rahmat-Nya kepada kita, dan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Makassar, 27 April 2015

**Penulis**

## **ABSTRAK**

Perkuatan struktur dengan GFRP merupakan salah satu inovasi yang berkembang pada dunia konstruksi saat ini. Penggunaan material ini cukup luas terutama pada struktur yang telah mengalami penurunan kapasitas akibat umur, pengaruh lingkungan, ataupun pembebanan secara terus-menerus. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lentur balok dengan perkuatan GFRP akibat pengaruh rendaman air laut. Pengujian dilakukan dengan pembebanan fatik dimana benda uji dibebani secara terus-menerus hingga mengalami kegagalan. Benda uji berupa balok beton bertulang dengan ukuran 15 cm x 20 cm x 330 cm sebanyak 3 buah. Masing-masing benda uji diberi perlakuan yang berbeda-beda, 1 balok dengan perkuatan GFRP tanpa perendaman, 1 balok dengan perkuatan GFRP dengan waktu rendaman 1 bulan dan 1 balok dengan perkuatan GFRP dengan waktu rendaman 6 bulan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa persentase selisih momen kapasitas yang terjadi pada balok dengan rendaman 1 bulan dan 6 bulan sebesar 11.53%.

**Kata kunci : Kapasitas Lentur, GFRP, Fatik**

## **ABSTRACT**

Strengthening of structures with GFRP is one innovation that developed in the construction of the world's. The use of this material is quite extensive, especially in structure which has decreased capacity due to age environmental influences, or by continuous loading. This research aims to analyze the behavior of flexure beams with GFRP reinforcement due to the influence of sea water immersion. Tests carried out with fatigue loading where the specimens were continuously until failure. Test specimens in the form of reinforced concrete beams with a size of 15 cm x 20 cm x 330 cm by 3 units. Each specimen was given a different treatment, 1 beam with GFRP reinforcement without soaking, 1 beam with GFRP reinforcement with immersion time 1 month and 1 beam with GFRP reinforcement with immersion time 6 months. The test results showed that the percentage difference between the moment of capacity that occurs in the beam with the marinade 1 month and 6 months at 11:53%.

***Keywords:*** Flexural capacity, GFRP, Fatigue

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Hasil Penelitian Sebelumnya.....	6
2.2 Kerangka Pikir Penelitian .....	7
2.3 Beton Bertulang .....	8
2.4 Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan GFRP .....	18



2.5 Fatik .....	26
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>33</b>
3.1 Jenis Penelitian.....	33
3.2 Desain Penelitian.....	34
3.3 Variabel Benda Uji.....	35
3.4 Set Up Pengujian.....	35
3.5 Bagan Alir Penelitian .....	37
3.6 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	38
3.7 Alat dan Bahan Penelitian.....	38
3.8 Prosedur Pemasangan GFRP .....	40
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>42</b>
4.1 Karakteristik Bahan .....	42
4.2 Pengujian Balok Beton Bertulang Dengan Pembebanan Fatik.....	44
4.3 Kapasitas Lentur Balok .....	56
4.4 Pola Keretakan .....	57
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>60</b>
5.1 Kesimpulan .....	60
5.2 Saran.....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>61</b>

## DAFTAR TABEL

<b>nomor</b>		<b>halaman</b>
1.	Karakteristik Fiber Lepas	22
2.	Karakteristik Fiber Komposit	22
3.	Sifat Material Epoxi	24
4.	Variabel Benda Uji	35
5	Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan	42
6	Karakteristik Beton	43
7	Beban Dan Momen Ultimit Balok	56

## **DAFTAR GAMBAR**

<b>nomor</b>	<b>halaman</b>
1. Kerangka pikir penelitian	7
2. Kurva tegangan-regangan beton	9
3. Distribusi tegangan dan regangan pada balok tulangan tunggal	11
4. Hubungan beban-defleksi pada balok (E.G.Nawy : 1990)	14
5. GFRP tipe SEH51 dan epoxy	24
6. Regangan untuk metode ACI 440-2R-08	25
7. Grafik hasil pengujian fatik (fatigue est)	30
8. Jenis siklus yang terjadi pada pembebanan fatik	31
9. Profil memanjang dan melintang benda uji	34
10. Set up pengujian	36
11. Kerangka prosedur penelitian	37
12. Alat Pi Gauge	39
13. Alat LVDT	39
14. Alat Load Cell	39
15. Pengujian kuat tarik dan kuat lentur	43
16. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan beton	44
17. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan baja	45
18. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan GFRP	46
19. Grafik hubungan siklus pembebanan dan lendutan	47
20. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan beton	48
21. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan baja	49
22. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan GFRP	50
23. Grafik hubungan siklus pembebanan dan lendutan	51
24. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan beton	52
25. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan baja	53
26. Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan GFRP	54
27. Grafik hubungan siklus pembebanan dan lendutan	55

28.	Pengaruh waktu rendaman terhadap siklus kegagalan	57
29.	Pola retak balok rendaman 0 bulan	58
30.	Pola retak balok normal 1 bulan	58
31.	Pola retak balok normal 6 bulan	59

## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

<u>Lambang/Singkatan</u>	<u>Arti dan keterangan</u>
$a$	Tinggi blok penampang ekuivalen
$A_f$	Luas penampang FRP
$b$	Lebar penampang balok
$b_f$	Lebar penampang FRP
$c$	Jarak dari regangan tekan ke garis netral
$C_c$	Gaya tekan pada beton
$C_E$	Koefisien reduksi material FRP akibat pengaruh tempat penyimpanan
$E$	Modulus elastisitas bahan
$E_c$	Modulus elastisitas beton
$E_s$	Modulus elastisitas baja
$E_f$	Modulus elastisitas FRP
$f'_c$	Tegangan beton
$f_{fu}$	Tegangan putus FRP
$h$	Tinggi balok
$I_{cr}$	Momen inersia penampang retak
$I_g$	Momen inersia penampang utuh
$L_f$	Panjang pemasangan FRP
$M_n$	Momen nominal penampang
$M_{nf}$	Momen nominal penampang kontribusi FRP
$n$	Jumlah lembaran FRP yang digunakan

$T$	Gaya tarik yang bekerja
$T_c$	Gaya tarik beton yang bekerja
$T_f$	Gaya tarik FRP yang bekerja
$T_u$	Kapasitas rekatan ultimit FRP
$l$	Koefisien pengali tinggi blok ekuivalen beton
	Regangan
$\epsilon_c$	Regangan pada sisi tarik beton
$\epsilon'_c$	Regangan pada sisi tekan beton
$\epsilon''_c$	Regangan pada sisi tekan beton pada kondisi ultimit
$\epsilon_f$	Regangan pada FRP
$\epsilon_{bi}$	Regangan beton akibat berat sendiri elemen struktur
$\epsilon_{fd}$	Regangan <i>debonding</i> FRP
$\epsilon_{fe}$	Regangan efektif FRP
$\epsilon_{fu}^*$	Regangan putus FRP
	Faktor reduksi

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Beton bertulang merupakan struktur yang sangat lasim dalam dunia konstruksi saat ini. Pengetahuan tentang perilaku beton sangatlah penting untuk menghindari terjadinya kesalahan struktural pada beton ataupun dalam perbaikan atau perkuatan struktur yang mengalami kerusakan. Salah satu inovasi dari konstruksi beton adalah perkuatan pada elemen-elemen struktur beton bertulang. Perkuatan struktur diperlukan pada struktur-struktur yang telah mengalami penurunan kekuatan akibat umur, pengaruh lingkungan, perubahan fungsi struktur, desain awal yang kurang, kelemahan perawatan, ataupun kejadian-kejadian alam seperti gempa bumi.

Banyak bangunan-bangunan infrastruktur dibangun lebih dari 30 tahun yang lalu masih tetap berdiri, namun seiring bertambahnya usia dan perubahan pembebanan pada bangunan tersebut tingkat kelayakannya menjadi berkurang. Pada jembatan jalan raya misalnya, perubahan beban akibat volume kendaraan dalam kurun waktu tertentu akan memperlemah struktur tersebut bahkan bisa berakhir dengan keruntuhan. Fenomena seperti inilah yang disebut dengan fatik yaitu kegagalan dibawah beban berulang. Mekanisme kerusakan fatik dibagi menjadi tiga tahap yaitu inisiasi atau pembentukan retak(*crack initiation*), pertumbuhan dan perambatan retak (*crack growth, crack propagation*) dan kerusakan fatik (*fatigue damage*). Proses kerusakan fatik dimulai dari pembebanan berulang pada material selama waktu tertentu sehingga terbentuk

regangan plastis pada daerah konsentrasi tegangan. Regangan plastis ini akan memicu terbentuknya inisiasi retak. Tegangan tarik kemudian akan memicu inisiasi retak untuk tumbuh dan merambat sampai terjadinya kerusakan.

Pembebanan berulang akan memperlemah suatu struktur walaupun tegangan yang bekerja lebih kecil dari tegangan yang diisinkan. Oleh karena itu perlu adanya perkuatan pada struktur yang telah mengalami penurunan kinerja. Salah satu metode perkuatan struktur adalah dengan menggunakan material komposit berupa serat sebagai penguat dan polimer sebagai matriks pengikat yang dikenal dengan Fibre Reinforced Polymer (FRP). Fibre Reinforced Polymer (FRP) terbagi atas tiga jenis yaitu CFRP, AFRP, dan GFRP tetapi yang paling berkembang saat ini adalah GFRP karena harganya yang lebih murah dan penggunaannya cukup luas.

GFRP merupakan material yang tahan korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi, elastis, dektalitas tinggi dan merupakan material yang cukup ringan. Pada struktur beton bertulang yang telah mengalami kegagalan, penggunaan GFRP dapat mengembalikan bahkan meningkatkan kinerja dari beton bertulang itu sendiri. Saat ini GFRP sering digunakan sebagai bahan perkuatan pada struktur bangunan maupun jembatan yang berinteraksi langsung dengan lingkungan seperti sinar matahari, air laut, maupun kondisi lainnya. Pada umumnya GFRP diletakkan pada bagian struktur yang mulai menunjukkan penurunan kinerja yaitu dengan cara menempelkan atau melilitkan GFRP pada bagian yang lemah sehingga GFRP dapat menyokong struktur untuk tetap bertahan pada posisi yang diharapkan.



Namun terdapat kelemahan dalam aplikasi dari bahan ini dimana pada beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa kegagalan yang terjadi pada beton yang menggunakan GFRP adalah kegagalan lekatan dimana GFRP terlepas dari beton(*debonding*).

Pada penelitian ini penulis bermaksud mengkaji bagaimana **pengaruh rendaman air laut terhadap kapasitas lentur balok dengan perkuatan GFRP akibat beban fatik.**

### **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas dapat dapat dirumuskan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh beban fatik terhadap kapasitas lentur balok dengan perkuatan GFRP.
2. Bagaimana penurunan kapasitas lentur balok yang terekspos air laut akibat beban fatik.

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh beban fatik terhadap kapasitas lentur balok dengan perkuatan GFRP.
2. Untuk mengetahui penurunan kapasitas lentur balok yang terekspos air laut akibat beban fatik.

#### **1.4. Batasan Masalah**

Untuk mencapai tujuan penelitian di atas maka penelitian ini dibatasi pada:

1. Benda uji adalah balok beton bertulang.
2. Jenis GFRP yang digunakan adalah GFRP-S.
3. Waktu perendaman 1 sampai 6 bulan.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh beban fatik terhadap kapasitas lentur balok dengan perkuatan GFRP.
2. Memberikan informasi mengenai penurunan kapasitas lentur balok yang terekspos air laut akibat beban fatik.

#### **1.6. Sistematika Penulisan**

Gambaran umum mengenai isi penelitian ini, dapat dituliskan secara singkat sebagai berikut :

##### **BAB I   Pendahuluan**

Menjelaskan latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

##### **BAB II   Tinjauan Pustaka**

Berisikan tinjauan kerangka konseptual yang memuat beberapa teori dasar tentang balok lentur, GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), dan juga beban fatik.

### BAB III Metodologi Penelitian

Berisikan metode penelitian yang meliputi tahap-tahap penelitian, jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian dan variabel penelitian.

### BAB IV Hasil dan Pembahasan

Berisikan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengujian sampel beton normal dan balok lentur beton dengan perkuatan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), dan perbandingan hasil pengujian berdasarkan waktu yang telah ditentukan.

### BAB V Penutup

Berisikan simpulan dan saran.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Hasil Penelitian Sebelumnya**

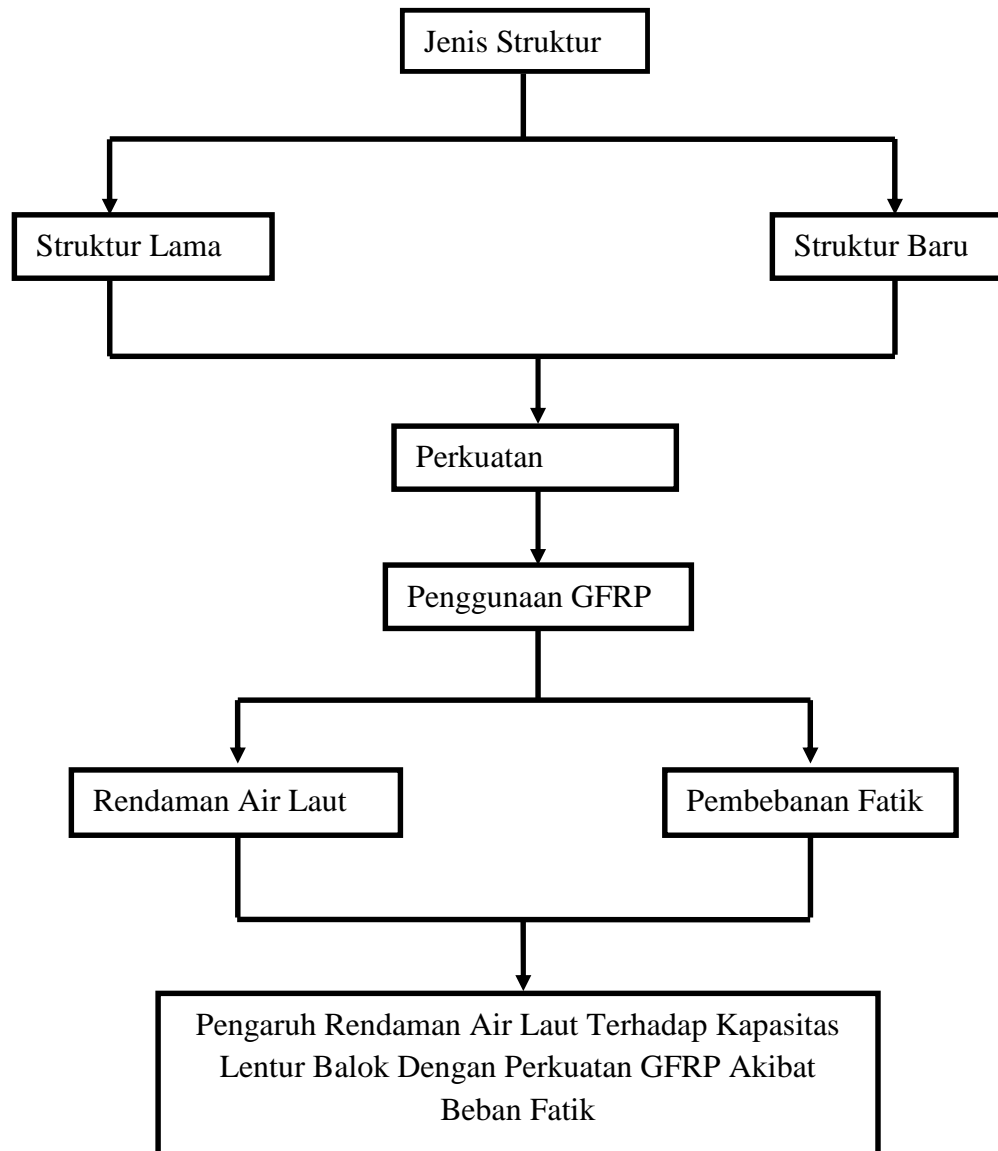
Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh **I Ketut Sudarsana dan Ida Bagus Rai Widarsa(2008)** mengenai perilaku runtuh balok beton bertulang yang diperkuat dengan glass fibre reinforced polymer(GFRP), beliau mengambil beberapa kesimpulan yaitu :

1. Penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan kuat lentur balok yaitu sebesar 10,8% untuk penambahan satu lapis GFRP dan 13,4% untuk penambahan dua lapis GFRP
2. Penambahan lapis GFRP dapat meningkatkan beban retak sebesar 20% baik untuk penambahan 1 lapis GFRP maupun penambahan 2 lapis GFRP

**Fikri Alami (2010)** dalam studi eksperimental perkuatan lentur balok beton bertulang dengan perkuatan GFRP, menyimpulkan bahwa:

1. Balok beton bertulang dengan perkuatan GFRP mengalami peningkatan kekuatan sebesar 62,08% sampai 75,13% dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan.
2. Balok beton bertulang dengan perkuatan GFRP memiliki sifat paling daktil karena mampu menahan deformasi yang cukup besar.

## 2.2. Kerangka Pikir Penelitian



Gambar 2.1 Kerangka Pikir Penelitian

## **2.3. Beton Bertulang**

### **2.3.1. Pengertian Beton Bertulang**

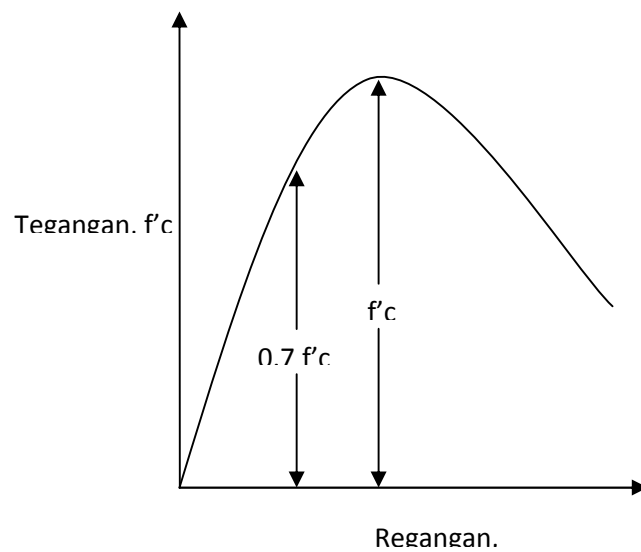
Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan jumlah dan luas tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang diisyaratkan dengan atau tanpa prategang dan direncanakan dengan asumsi bahawa kedua material bekerja sama dalam menahan gaya yang bekerja dimana tulangan baja menahan gaya tarik dan beton hanya menerima gaya tekan .

### **2.3.2. Perilaku Balok Beton Bertulang**

Adapun perilaku balok beton bertulang yang perlu diperhatikan adalah:

#### **1. Tegangan-Regangan**

Hubungan tegangan-regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan-persamaan analisis dan desain juga prosedur-prosedur pada struktur beton. Gambar dibawah memperlihatkan kurva tegangan-regangan tipikal yang diperoleh dari percobaan dengan menggunakan benda uji silinder beton dan dibebani tekan uniaksial selama beberapa menit. Bagian pertama kurva ini (sampai sekitar 40% dari  $f_c'$ ) pada umumnya untuk tujuan praktis dapat dianggap linier. Sesudah mendekati 70% tegangan hancur, materialnya banyak kehilangan kekakuannya sehingga menambah ketidaklinieran diagram. Pada beban batas, retak yang searah dengan arah beban menjadi sangat terlihat dan hampir semua silinder beton (kecuali yang kekuatannya sangat rendah) akan segera hancur.



Gambar 2.2 Kurva Tegangan-Regangan Beton

## 2. Kuat Lentur Beton

Dalam kondisi tertentu seperti pada perencanaan konstruksi jalan dan perkerasan bandara, kriteria kuat lentur dianggap lebih penting dibandingkan kuat tekan beton. Kuat lentur merupakan kuat tarik beton tak langsung dalam keadaan lentur akibat momen dari beton. Kuat lentur maksimum terjadi pada serat bawah balok beton yang mengalami pembebanan arah transversal. Kondisi ini dikenal sebagai *modulus of rupture* dari beton yang besarnya tergantung jenis pembebanan yang diterima dan panjang balok beton itu sendiri.

Jika suatu balok terbuat dari material yang elastik linier, isotropis, dan homogen, maka tegangan lentur maksimumnya dapat diperoleh dengan rumus lentur balok yang terkenal, yaitu  $f = M.y/I$ . (Nawy. 2009:99).

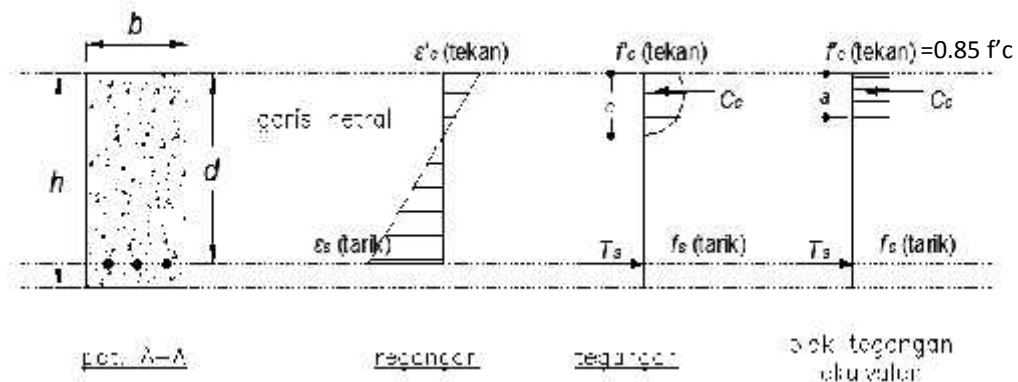
### 2.3.3. Kapasitas Lentur Balok Beton Normal

Pada suatu kondisi tertentu balok dapat menahan beban yang terjadi hingga regangan tekan lentur beton maksimum  $(\epsilon_c)_{maks}$  mencapai 0.003 sedangkan tegangan tarik tulangan mencapai tegangan leleh  $f_y$ . Jika hal itu terjadi, maka nilai  $f_s = f_y$  dan penampang dinamakan mencapai keseimbangan regangan (penampang bertulangan seimbang).

Berdasarkan pada asumsi yang telah dikemukakan di atas, dapat dilakukan pengujian regangan, tegangan, dan gaya-gaya yang timbul pada penampang balok yang bekerja menahan momen batas ( $M_u$ ), yaitu momen yang timbul akibat beban luar pada saat terjadi kehancuran. Kuat lentur balok beton terjadi karena berlangsungnya mekanisme tegangan-regangan dalam yang timbul di dalam balok, pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam. Seperti tampak pada Gambar 2.3, di mana  $C_c$  merupakan resultan gaya tekan dalam dan merupakan resultan gaya tekan pada daerah yang berada diatas garis netral. Sedangkan  $T_s$  adalah merupakan resultan gaya tarik dalam dan merupakan seluruh gaya tarik yang direncanakan untuk daerah yang berada di bawah garis netral.

Resultan gaya tekan dalam dan resultan gaya tarik dalam arah garis kerjanya sejajar, sama besar namun berlawanan arah dengan jarak  $z$  sehingga membentuk kopel momen tahanan dalam, dimana nilai maksimumnya disebut sebagai kuat lentur.





Gambar 2.3 Distribusi tegangan dan regangan pada balok tulangan tunggal

Keterangan pada gambar 2.3 :

- a = tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen (  $a = \beta_1 \cdot c$  )
- $\beta_1$  = faktor pembentuk tegangan beton tekan ekuivalen, bergantung pada  $f'_c$  ( SNI 03-2847-2002, pasal 12.2.7.3 )

Untuk  $f'_c \leq 30$  MPa, maka  $\beta_1 = 0.85$

Untuk  $f'_c > 30$  MPa, maka  $\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05 \cdot (f'_c - 30)}{7}$

Tetapi,  $\beta_1 \geq 0.65$

- c = jarak antara garis normal ke tepi serat tekan beton (mm)
- $A_s$  = luas tulangan tarik ( $\text{mm}^2$ )
- b = lebar penampang balok (mm)
- h = tinggi penampang balok (mm)
- $C_c$  = Gaya tekan beton (kN), dengan ( $C_c = 0.85 f'_c \cdot a \cdot b$  )
- $T_s$  = gaya tarik tulangan (kN), dengan ( $T_s = A_s \cdot f_s$ )
- d = tinggi efektif balok, jarak dari pusat tulangan tarik ke tepi serat tekan beton (mm)
- $f'_c$  = kuat tekan beton disyaratkan 28 hari (MPa)

$E_s$  = modulus elastisitas baja (200.000 MPa)

$f_s$  = tegangan tarik baja tulangan ( $f_s = \epsilon_s \cdot E_s$ )

$f_y$  = tegangan tarik baja saat leleh (MPa)

$M_n$  = momen nominal aktual (kNm)

$\epsilon_s$  = regangan tarik baja tulangan

$\epsilon_y$  = regangan tarik baja tulangan saat leleh ( $\epsilon_y = f_y / E_s = f_y / 200.000$ )

$\epsilon'_{cu}$  = regangan tekan beton ultimate = 0.003

Pada keadaan seimbang, nilai  $C_c = T_s$ , sehingga luas tulangan longitudinal dapat ditentukan dengan persamaan

$$0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$A_s = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b}{f_y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Dari gambar 2.3, nampak bahwa gaya  $C_c$  dan  $T_s$  bekerja berlawanan arah dan terpisah oleh jarak  $z = d - a/2$ , sehingga akan timbul momen kopel yang disebut momen nominal yang arahnya berlawanan arah jarum jam dengan persamaan sebagai berikut:

$$M_n = C_c \cdot (d - a/2) = 0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot (d - a/2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

atau

$$M_n = T_s \cdot (d - a/2) = A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

selanjutnya, kita tentukan persamaan momen pikul dapat diberikan dalam persamaan

$$K = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \frac{M_u}{\phi b \cdot d^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

lalu dengan mendistribusi persamaan momen pikul ke persamaan momen nominal, maka nilai  $a$  dapat ditentukan dengan persamaan

$$a = \left( 1 - \sqrt{\frac{1-2K}{0.85 f'_c}} \right) \cdot d \dots\dots\dots (6)$$

dari gambar 2.3, kita dapat menentukan nilai regangan beton dengan persamaan

$$\frac{\epsilon'_c}{d} = \frac{\epsilon_y}{d-c}$$

$$\epsilon'_c = \frac{\epsilon_y \cdot d}{d-c} \dots\dots\dots (7)$$

dengan mensubstitusi nilai  $c = a/1$ , maka nilai regangan beton adalah

$$\epsilon'_c = \frac{a}{\beta_1 d - a} \epsilon_y \dots\dots\dots (8)$$

#### 2.3.4. Jenis keruntuhan balok lentur

Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang. Ada 3 kemungkinan yang bisa terjadi penyebab kegagalan balok beton bertulang :

##### 1) Kondisi Balanced Reinforced

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan.

Kondisi regangan :  $\epsilon_c = 0.003$  dan  $\epsilon_s = \frac{F_y}{E_s}$

Pada kondisi ini berlaku :  $\rho = \rho_{balanced}$  dan  $\epsilon_s = \epsilon_c$

##### 2) Kondisi Over-Reinforced

Kondisi terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan balanced. Keruntuhan ditandai dengan

hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh.

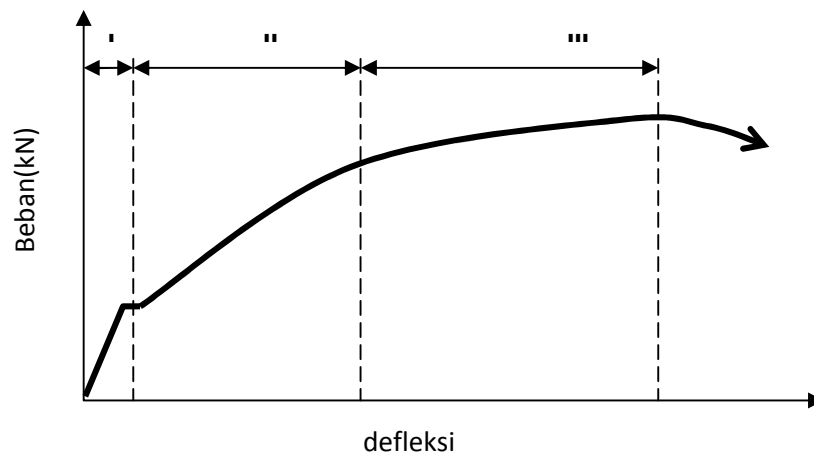
Pada kondisi ini berlaku :  $\rho > \rho_{balanced}$  dan  $s < c$

### 3) Kondisi Under-Reinforced

Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi balanced. Keruntuhan ditandai dengan lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya.

Pada kondisi ini berlaku :  $\rho < 75\% \rho_{balanced}$  dan  $s > c$

#### 2.3.6. Analisa Lendutan pada Balok



Gambar 2.4 Hubungan Beban-Defleksi pada Balok (E.G.Nawy : 1990)

Hubungan beban-defleksi balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear sebelum terjadi rupture seperti pada diagram gambar (Edward G. Nawy, 1990):

**Daerah I :** Taraf praretak, dimana batang-batangnya strukturalnya bebas retak. Segmen praretak dari kurva beban - defleksi berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok lebih kecil dari kekuatan tariknya akibat lentur atau lebih kecil dari modulus

rupture ( $f_r$ ) beton. Kekakuan lentur  $EI$  balok dapat diestimasikan dengan menggunakan modulus Young  $E_c$  dari beton, dan momen inersia penampang balok tak retak.

$$E_c = 0,043 w_c^{1,5} \cdot f_c' \dots\dots\dots(9)$$

Untuk beton normal

$$E_c = 4700 f_c \dots\dots\dots (10)$$

Modulus elastisitas baja

$$E_s = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (11)$$

Untuk estimasi akurat momen inersia ( $I$ ) memerlukan peninjauan kontribusi tulangan  $A_s$ . Ini dapat dilakukan dengan mengganti luas baja dengan luas beton ekivalen  $(E_s/E_c)A_s$  karena  $E_s$  lebih besar dari  $E_c$ .

**Daerah II** : Taraf beban pascaretak, dimana batang-batang struktural mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya. Balok pada tumpuan sederhana retak akan terjadi semakin lebar pada daerah lapangan, sedangkan pada tumpuan hanya terjadi retak minor yang tidak lebar. Apabila sudah terjadi retak lentur maka kontribusi kekuatan tarik beton sudah sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti pula kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban -defleksi didaerah ini akan semakin landai dibanding pada taraf praretak. Momen Inersia retak disebut  $I_{cr}$ .

**Daerah III** : Taraf retak *pasca-serviceability*, dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya. Diagram beban defleksi daerah III jauh lebih datar dibanding daerah sebelumnya. Ini diakibatkan oleh hilangnya kekuatan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar sepanjang

bentang. Jika beban terus ditambah ,maka regangan s pada tulangan sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan lelehnya y tanpa adanya tegangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya telah leleh dikatakan telah runtuh secara struktural. Balok ini akan terus mengalami defleksi tanpa adanya penambahan beban dan retaknya semakin terbuka sehingga garis netral terus mendekati tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan skunder yang mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya rupture.

SK.SNI.03–2847-2002 merekomendasikan perhitungan lendutan dengan menggunakan momen inersia efektif  $I_e$ , dengan syarat  $I_{cr} < I_e < I_g$ , dimana :

$$I_g = \frac{1}{12}bh^3 \dots\dots\dots(12)$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}by^3 + nA_s(d - y)^2 \dots\dots\dots(13)$$

dengan :

$$n = \frac{E_s}{E_c} \dots\dots\dots(14)$$

garis netral :  $y = \frac{n.A_s}{b} \left[ \sqrt{\left(1 + \frac{2bd}{n.A_s}\right)} - 1 \right] \dots\dots\dots(15)$

Momen inersia efektif :

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left\{ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right) \right\}^3 I_{cr} \dots\dots\dots(16)$$

dimana :

$I_e$  = momen inersia efektif

$I_{cr}$  = momen inersia penampang retak transformasi

$I_g$  = momen inersia penampang utuh terhadap sumbu berat penampang, seluruh batang tulangan diabaikan.

$M_a$  = momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung.

$M_{cr}$  = momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \dots\dots\dots(17)$$

Dimana  $f_r$  = modulus retak beton

$$f_r = 0.7 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(18)$$

$y_t$  = jarak dari garis netral penampang utuh (mengabaikan tulangan baja) ke serat tepi tertarik.

Lendutan pada komponen struktur merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan dan kondisi ujung bentang, jenis beban, baik beban terpusat ataupun beban merata dan kekakuan lentur komponen. Untuk menentukan lendutan maksimum dapat diselesaikan dengan persamaan sebagai berikut :

a. Untuk beban merata  $q$  sepanjang bentang

$$= \frac{5 q L^4}{384 E I} \dots\dots\dots(19)$$

b. Untuk 2 beban terpusat  $P$  masing-masing berjarak  $a$  dari perletakan

$$= \frac{P a}{24 E I} (3l^2 - 4a^2) \dots\dots\dots(20)$$

## **2.4. Balok beton bertulang dengan perkuatan GFRP**

### **2.4.1. Fiber Reinforced Polimer**

Aplikasi material FRP sebagai fungsi perbaikan dan perkuatan struktur beton yang sudah ada telah berkembang pesat di beberapa negara seperti Amerika Utara (Labossiere et.al. 1997; Hasen et.al. 1998; Grace and Abdel-Sayed 2003), Eropa (Meier et.al. 1992; Steiner 1996; Nanni 1997; Matthys et.al. 2004; Blasi et.al. 2004; Rostasy et.al. 2004) dan di Jepang (Ichimasu et.al. 1993; Katsumata et.al. 2001). Teknik perkuatan seperti ini dapat dibuat efisien, tidak menyebabkan karat seperti plat baja external. Fungsi perkuatan dengan sistim komposit FRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi diantaranya. Daya tahan FRP yang tinggi lebih ekonomis digunakan pada lingkungan korosif dimana baja akan mudah berkarat. Penggunaan FRP lebih populer mengingat banyaknya keuntungan yang dapat diperoleh seperti bobot unit yang kecil, mudah diaplikasikan dan ditangani, biaya instalasi dan pemeliharaan yang rendah. Kerugian yang paling prinsip penggunaan FRP sebagai sistim perkuatan adalah harga material yang relatif lebih mahal. Pada situasi tertentu, FRP memberikan jalan keluar yang paling ekonomis dalam masalah perkuatan karena secara dramatis dapat menekan biaya tenaga kerja [Meier and Erki, 1997].

FRP dapat digunakan untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang, lentur pelat, desak, geser dan lentur kolom. FRP dalam bentuk lembaran, plat atau batangan dapat dipasang pada permukaan balok atau plat yang



mengalami peregangan sebagai perkuatan lentur. Sebagai perkuatan geser balok, lembaran FRP dapat direkatkan pada sisi balok. Fibre Reinforced Polymer (FRP) terbagi atas tiga jenis yaitu CFRP, AFRP, dan GFRP tetapi yang paling berkembang saat ini adalah GFRP karena harganya yang lebih murah dan penggunaannya cukup luas.

#### **2.4.2. Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)**

*Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) adalah material komposit yang terdiri dari *fibre* (serat) *glass* yang disatukan zat matrik, seperti *epoxy* atau *polyester*. Matrik itu sendiri berfungsi sebagai media penyalur tegangan ke serat dan melindungi serat dari pengaruh lingkungan yang agresif (Feldman dan Hartono, 1995). Material ini cukup memiliki banyak keuntungan yang dapat diberikan yaitu merupakan material yang tahan korosi, mempunyai kuat tarik yang tinggi, superior dalam daktilitas, lebih ringan sehingga tidak memerlukan peralatan yang berat untuk dibawa ke lokasi. Beberapa jenis serat kaca yang tersedia di pasaran adalah :

- (a) ***E-Glass***, yang memiliki kandungan alkali yang lebih rendah dan merupakan jenis yang paling banyak digunakan. Keuntungannya memiliki sifat mekanis yang tinggi
- (b) ***Z-Glass***, digunakan untuk mortar semen dan beton karena memiliki resistensi yang tinggi terhadap serangan alkali
- (c) ***A-Glass***, yang memiliki kandungan alkali tinggi
- (d) ***C-Glass***, yang digunakan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan korosi yang besar untuk asam, seperti aplikasi kimia.

(e) *S atau R-Glass*, yang diproduksi untuk ekstra kekuatan tinggi dan modulus yang tinggi.

Serat *glass* adalah jenis serat sintesis yang paling banyak digunakan. Harganya relatif murah dan sudah tersedia cukup banyak di pasaran. Serat jenis ini biasanya digunakan sebagai penguat matrik jenis polymer. Kuat tarik fiber glass yang tinggi membuat GFRP dapat dimanfaatkan sebagai tulangan yang menerima gaya tarik pada elemen struktur. GFRP dapat dibuat berbentuk batangan atau pelat. Khusus untuk yang berbentuk pelat, dibuat dari anyaman serat GFRP yang direkatkan lapis per lapis dengan matrik (pengisi) dari bahan epoxy. Karena itu jumlah dan arah dari serat akan berpengaruh terhadap kuat tarik GFRP.

Semakin cermat penataannya makin banyak serat yang dapat dimasukkan sehingga semakin besar pula kuat tariknya. Pemakaian FRP pada suatu konstruksi biasanya disebabkan oleh beberapa hal yaitu :

- Terjadi kesalahan perencanaan
- Adanya kerusakan-kerusakan dari bagian struktur sehingga dikhawatirkan tidak berfungsi sesuai dengan yang diharapkan.
- Adanya perubahan fungsi pada sistem struktur dan adanya penambahan beban yang melebihi beban rencana

Ada beberapa keuntungan penggunaan FRP sebagai perkuatan struktur, antara lain :

- Kuat tarik sangat tinggi ( $\pm 7-10$  kali lebih tinggi dari U39)
- Sangat ringan (density 1.4-2.6 gr/cm<sup>3</sup>, 4-6 kali lebih ringan dari baja)

- Pelaksanaan sangat mudah dan cepat
- Memungkinkan untuk tidak menutup lalu lintas (mis : jembatan dll)
- Tidak memerlukan area kerja yang luas
- Tidak memerlukan joint, meskipun bentang yang harus diperkuat cukup panjang
- Tidak berkarat (non logam)

Terdapat juga kelemahan dari FRP, yaitu :

- Ketahanan terhadap kebakaran (harus dilakukan lapisan tahan kebakaran)
- Pengrusakan dari luar (umumnya untuk fasilitas umum harus dilakukan lapisan penutup dari mortar).

Model kegagalan yang sering terjadi pada balok yang diperkuat dengan FRP yaitu:

- Rusaknya FRP setelah tulangan tarik meleleh
- Inti beton rusak karena tekanan sebelum tulangan tarik meleleh
- Lepasnya ikatan antara FRP dan beton (debonding)
- Putusnya lapisan GFRP ( *GFRP Failure* )

### 2.4.3. Karakteristik Material GFRP

#### a. Dalam keadaan lepas

**Tabel 2.1** Karakteristik Fiber Lepas

PROPERTI TYPICAL FIBER LEPAS	
Tegangan Tarik	470.000 psi (3.24 GPa)
Modulus Tarik	$10.5 \times 10^6$ psi (72.4 GPa)
Regangan Maksimum	4.5%
Kerapatan	0.092 lbs/ in <sup>3</sup> (2.55g/cm <sup>3</sup> )
Berat per yd kuadrat	27 oz (915 g/m <sup>2</sup> )
Tebal Fiber	0.14 (0.36 mm)

#### b. Dalam keadaan komposit

**Tabel 2.2** Karakteristik fiber komposit

PROPERTI LAPIS KOMPOSIT (GFRP + EPOXI)			
<i>Properti</i>	<i>Metode ASTM</i>	<i>Nilai Test</i>	<i>Nilai Desain</i>
Tegangan tarik Ultimate dalam arah utama fiber (Psi)	D-3039	83.400 psi (575 MPa) (4.17 kip/in width)	66.720 psi (460 MPa) (3.3 kip/in. width)
Regangan	D-3039	2.2%	2.2%
Modulus Tarik, psi	D-3039	$3.79 \times 10^6$ psi (26.1 GPa)	$3.03 \times 10^6$ psi (20.9 GPa)
Tegangan tarik ultimate 90° dari arah utama fiber, psi	D-3039	3750 psi (25.8 MPa)	3000 psi (20.7 MPa)
Tebal lapisan		0.05 in (1.3mm)	0.05 in (1.3mm)

#### **2.4.4. Epoxy (Perekat)**

Epoxy atau polyepoxide adalah sebuah polimer epoxide thermosetting yang bertambah bagus bila dicampur dengan sebuah agen katalis atau pengeras. Kebanyakan resin epoxy diproduksi dari reaksi antara epichlorohydrin dan bisphenol-A. Resin biasanya poliester dua bagian, vinil atau epoxy dicampur dengan pengeras dan diterapkan ke permukaan. Lembar fiberglass diletakkan ke dalam cetakan, campuran resin kemudian ditambahkan dengan menggunakan kuas atau roller. Materi yang harus sesuai dengan cetakan, dan udara tidak boleh terjebak antara fiberglass dan cetakan. Resin tambahan diterapkan dan mungkin lembaran tambahan dari fiberglass. Tekanan tangan atau rol digunakan untuk memastikan jenuh resin dan penuh membasahi semua lapisan, dan setiap kantong-kantong udara akan dihapus. Pekerjaan harus dilakukan cukup cepat sebelum resin mulai bereaksi. Dalam beberapa kasus, pekerjaan ditutupi dengan plastik lembaran dan vakum ditarik pada pekerjaan untuk menghilangkan gelembung udara dan tekan fiberglass dengan bentuk cetakan.

Bahan perekat yang digunakan dalam penelitian ini juga merupakan produk dari Fyfe Co dengan nama Tyfo S komponen A dan komponen B seperti terlihat dalam Gambar 10. Untuk proses pencampuran antara komponen A dan komponen B digunakan perbandingan 2:1.



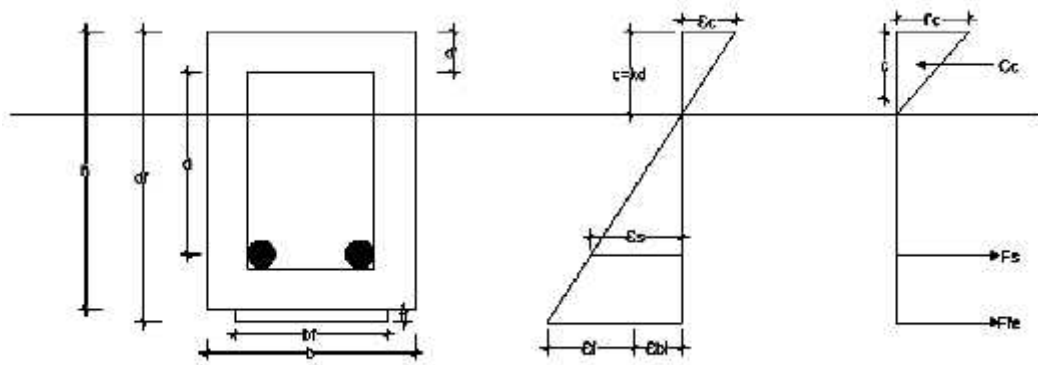
Gambar 2.5 GFRP Tipe SEH51 dan Epoxy

**Tabel 2.3** Sifat Material Epoksi

SIFAT MATERIAL EPOXI		
Waktupengeringan : 72 Jam (Suhuruang :60°C)		
SIFAT MATERIAL	METODE ASTM	NILAI TEST
Kekuatan Tarik	ASTM D-638	72.4 Mpa
Modulus Tarik		3.18 Gpa
Persen Regangan	ASTM D-638	5%
KekuatanLentur	ASTM D-790	123.4 Mpa
Modulus Lentur	ASTM D-790	3.12 Gpa

Sumber : *Fyfo.Co LLC*

#### 2.4.5. Kapasitas Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan FRP (ACI 440-2R-08)



Gambar 2.5 Regangan Untuk Metode ACI 440-2R-08

Untuk perkuatan lentur dengan FRP, perhitungan desain mengacu pada ACI committee 440. Perhitungan tersebut disajikan dalam rumus-rumus berikut.

Dalam mendesain kekuatan lentur diperlukan faktor reduksi terhadap momen yang terjadi.

$$\phi M_n \geq M_u \dots \dots \dots (21)$$

Dengan memberikan asumsi bahwa nilai regangan maksimum pada beton sebesar 0,003, maka regangan yang terjadi pada FRP dapat dihitung dengan persamaan:

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \dots \dots \dots (22)$$

Setelah mendapatkan nilai regangan pada FRP, Nilai tegangan pada FRP dapat dihitung dengan persamaan :

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \dots \dots \dots (23)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut nilai regangan dan nilai tegangan pada tulangan dapat dihitung. Setelah diketahui nilai regangan dan tegangan pada tulangan dan FRP, posisi garis netral dapat dicek berdasarkan gaya dalam yang terjadi dengan menggunakan persamaan :

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d-c}{d_f-c} \right) \dots\dots\dots (24)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \dots\dots\dots (25)$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b} \dots\dots\dots (26)$$

Kapasitas momen nominal perkuatan lentur dengan menggunakan FRP dapat dihitung dengan persamaan berikut. Untuk perkuatan lentur ACI committee 440 merekomendasikan nilai faktor reduksi untuk FRP ( $\omega_f$ ) sebesar 0,85

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \omega_f A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots\dots\dots (27)$$

## 2.5. Fatik

Fatik merupakan fenomena terjadinya kerusakan material karena pembebanan yang berulang ulang. Diketahui bahwa apabila pada suatu material dikenakan tegangan berulang, maka material tersebut akan patah pada tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik. Kerusakan akibat beban berulang dinamakan patah lelah atau fatigue failures. Karena umumnya patahan tersebut terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama. Kerusakan lelah biasanya timbul pada daerah dimana terjadi konsentrasi tegangan, yang ditentukan oleh



bentuk benda uji termasuk kondisi permukaan dan ketidaksempurnaan dari segi metalurgi. Mekanisme kerusakan fatik dibagi menjadi tiga tahap yaitu inisiasi atau pembentukan retak(*crack initiation*), pertumbuhan dan perambatan retak (*crack growth, crack propagation*) dan kerusakan fatik (*fatigue damage*). Proses kerusakan fatik dimulai dari pembebanan berulang pada material selama waktu tertentu sehingga terbentuk regangan plastis pada daerah konsentrasi tegangan. Regangan plastis ini akan memicu terbentuknya inisiasi retak. Tegangan tarik kemudian akan memicu inisiasi retak untuk tumbuh dan merambat sampai terjadinya kerusakan.

Dalam dunia rekayasa, fatik merupakan penyebab utama (sekitar 90%) kegagalan pada struktur. Pada komponen penyusun reaktor nuklir, fenomena fatik dapat terjadi pada beberapa sistem, misalnya fenomena fatik siklus rendah (*low cycles*) yang dapat terjadi pada komponen bejana tekan reaktor, pipa pendingin primer, pressurizer, main steam isolation valve dan pompa resirkulasi reaktor, sedangkan pada fatik siklus tinggi (*high cycles*), fatik dapat terjadi pada komponen pompa pendingin reaktor dan tube penukar panas.

Kerusakan yang terjadi secara tiba-tiba pada tingkat tegangan dibawah tegangan leleh merupakan alasan penting untuk memasukkan faktor ketahanan fatik dalam perencanaan komponen. Dengan mengetahui kekuatan fatik maka dapat diprediksi umur fatik komponen, dimana hal ini menjadi bahan pertimbangan dalam pengoperasian dan perawatan dalam rangka menghindari unscheduled shutdown. Didalam memprediksi umur fatik, terdapat tiga pendekatan yaitu pendekatan tegangan (*stress approach*) atau dengan istilah lain pendekatan

grafik S-N atau metode umur-tegangan (stress life method), pendekatan regangan (strain approach) atau istilah lain metode umur-regangan (strain-life method) dan pendekatan mekanika patahan (fracture mechanics).

### **2.5.1. Fenomena Fatik**

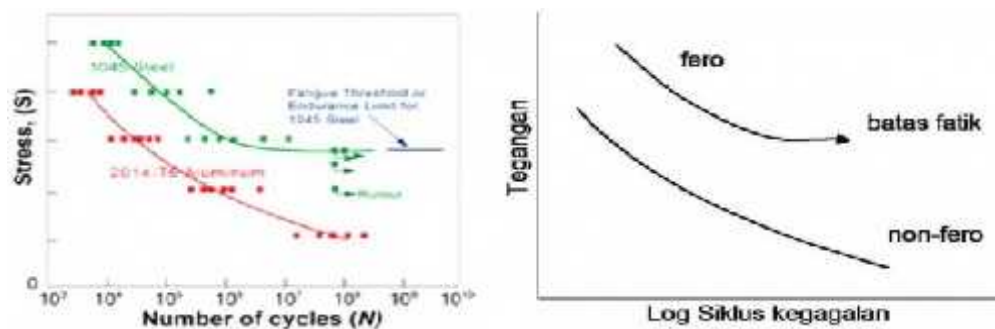
Diatas telah disebutkan tiga macam pendekatan yang digunakan dalam perencanaan dan analisis untuk memprediksi kapan, bilamana, sebuah komponen yang mendapatkan pembebanan berulang akan gagal fatik dalam batas waktu tertentu yaitu metode umur-tegangan (stress life method), metode umur-regangan (strain-life method) dan metode mekanika patahan (fracture mechanics). Masing-masing konsep memiliki keunggulan tergantung pada aplikasinya, walaupun berbeda-beda konsep namun kesemuanya bertujuan untuk memprediksi umur fatik. Berdasarkan umur fatik ( $N$ ), fatik dapat diklasifikasikan menjadi fatik siklus rendah (low cycles fatigue) untuk umur fatik  $100 \leq N \leq 10^3$  dan fatik siklus tinggi (high cycles fatigue) untuk umur fatik  $N \geq 10^3$ . Dua cara pendekatan yang pertama memiliki parameter yang sama yaitu mengolah parameter beban menjadi fungsi tegangan atau regangan terhadap siklus. Cara pendekatan yang terakhir menggunakan parameter perambatan retak (crack propagation) dengan memantau retak mula-mula yang memiliki laju pertumbuhan panjang retak yang proporsional dengan intensitas tegangan yang diterapkan untuk mencapai patah.

Dalam merancang suatu komponen, untuk menentukan tegangan aman yang diizinkan, para perekayasa sering menggunakan cara estimasi umur fatik dengan menggunakan pendekatan tegangan. Metode ini merupakan cara konvensional dan paling simpel, mudah dilakukan untuk aplikasi perencanaan,

sangat baik diterapkan pada kondisi pembebanan elastis, mampu menunjukkan batas rentang pakai yang aman (safe life) bahkan tak hingga (infinite life). Serta sangat tepat untuk perencanaan komponen pada kondisi fatik siklus tinggi. Namun perlu diperhatikan bahwa metode ini tidak cocok untuk kondisi fatik siklus rendah karena metode ini tidak dapat menghitung pengaruh tegangan-regangan sebenarnya pada saat terjadi deformasi peluluhan lokal, terbatas hanya pada material logam terutama baja karena pada material tertentu tidak dapat menunjukkan respon data yang tepat bila menggunakan pendekatan ini.

Syarat utama untuk menggunakan metode pendekatan tegangan mengacu pada asumsi perhitungan mekanika benda padat bahwa komposisi material idealnya homogen, kontinyu dan bebas cacat atau bebas retak. Tujuan utama menggunakan pendekatan ini pada perencanaan komponen adalah untuk mendapatkan umur pakai aman bahkan tak hingga.

Grafik S-N adalah grafik yang didapat dari hasil pengujian fatik yang merupakan grafik hubungan antara kekuatan fatik dan jumlah siklus pembebanan. Grafik S-N memberikan banyak informasi sifat fatik karena pada saat pengujian, dimasukkan faktor geometri, perlakuan permukaan, kondisi pembebanan, temperatur dan proses perlakuan material. Kekurangan grafik S-N adalah tidak dapat memprediksi deformasi plastis lokal dan efek dari tegangan rata-rata.

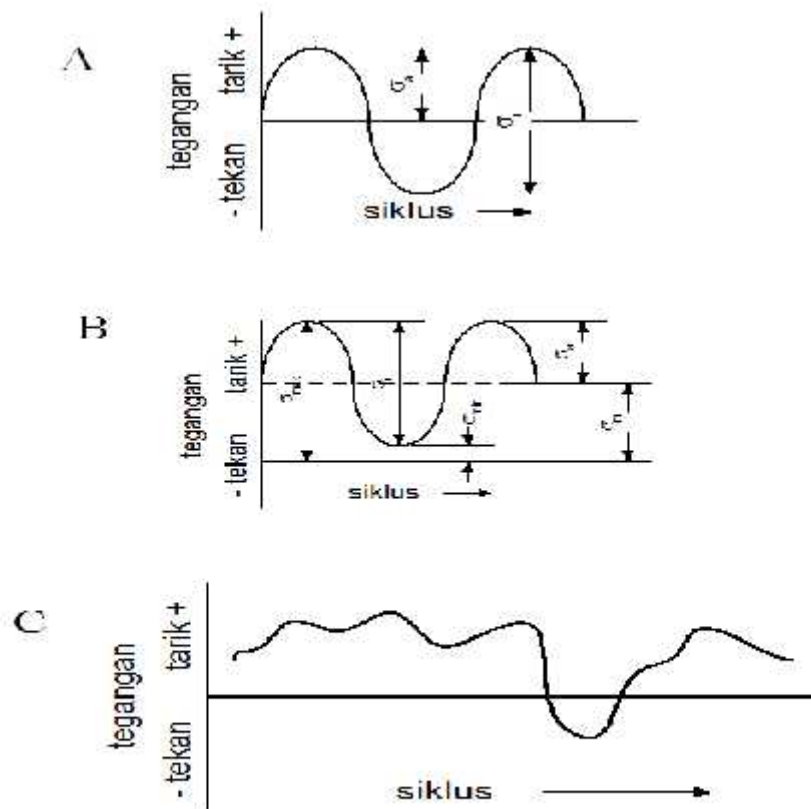


Gambar 2.6 Grafik Hasil Pengujian Fatik (Fatigue Test)

Dari grafik diatas terdapat informasi mengenai karakteristik fatik dari material, sumbu horizontal menunjukkan data jumlah siklus pembebanan dan sumbu vertikal menunjukkan kekuatan fatik. Pada rentang siklus  $10^7$  sampai  $10^8$  dapat diamati ada tiga buah data spesimen yang diberi tanda panah. Arti tanda ini adalah spesimen belum patah pada saat pengujian dihentikan. Kondisi ini dinamakan batas ketahanan material dalam menerima beban fatik (*endurance limit*). Tingkat tegangannya dinamakan tegangan *endurance* ( $\sigma_e$ ). Untuk merencanakan komponen yang memiliki umur pakai aman atau bahkan umur tak hingga maka tingkat tegangan yang diaplikasikan harus dibawah batas tegangan *endurance* nya.

Tiga jenis siklus tegangan yang umum terjadi akibat pembebanan fatik:

- Pembalikan sempurna (gambar a) – dimana fluktuasi tegangan berkisar suatu rata-rata (mean) sama dengan nol dengan amplitudo konstan;
- Pengulangan (gambar b) – dimana fluktuasi tegangan berkisar suatu rata-rata (mean) tidak sama dengan nol tetapi dengan amplitudo konstan; dan
- Rumit (gambar c) – dimana kedua pertukaran dan rata-rata beban berubah, bisa secara acak maupun berpola tertentu



Gambar 2.7 Jenis Siklus Yang Terjadi Pada Pembebanan Fatik

Faktor-faktor yang mempengaruhi fatik adalah:

- 1. Tegangan Siklik :** Besarnya tegangan siklik tergantung pada kompleksitas geometrid dan pembebanan.
- 2. Geometri :** Konsentrasi stress akibat variasi bentuk geometri merupakan titik dimulainya fatigue cracks.
- 3. Kualitas permukaan :** Kekasaran permukaan dapat menyebabkan konsentrasi stress mikroskopis yang menurunkan ketahanan fatik.
- 4. Tipe material :** Fatigue setiap material berbeda beda, contohnya komposit dan polymer memiliki fatigue yang berbeda dengan metal.

**5. Tegangan sisa** : Proses manufaktur seperti pengelasan, pemotongan, casting dan proses lainnya yang melibatkan panas atau deformasi dapat membentuk tegangan sisa yang dapat menurunkan ketahanan fatik material.

**6. Besar dan penyebaran internal defects** : Cacat yang timbul akibat proses casting seperti gas porosity, non-metallic inclusions dan shrinkage voids dapat menurunkan ketahanan fatik.

**7. Arah beban** : Untuk non-isotropic material, ketahanan fatik dipengaruhi oleh arah tegangan utama.

**8. Besar butir** : Pada umumnya semakin kecil ukuran butir akan memperpanjang fatigue..

**9. Temperatur** : Temperatur tinggi menurunkan ketahanan fatik

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Jenis Penelitian**

Penelitian yang dilakukan adalah studi pengaruh rendaman air laut terhadap kapasitas lentur balok dengan perkuatan GFRP akibat beban fatik. Penelitian ini dilaksanakan dengan tahapan sebagai berikut:

##### **1. Uji Fisik Material Beton Normal**

Uji fisik material beton yang dilakukan terdiri dari pengujian kuat tekan, uji lentur, serta modulus elatisitas. Untuk ketiga pengujian ini digunakan alat “Concrete Compression Testing Machine” kapasitas 100 ton dengan beberapa alat tambahan.

##### **2. Uji Fisik Material Baja Tulangan**

Pengujian ini meliputi pengujian kuat tarik tulangan  $\varnothing 14$  yang akan digunakan sebagai tulangan memanjang pada serat tarik dan diameter  $\varnothing 10$  sebagai tulangan sengkang.

##### **3. Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang**

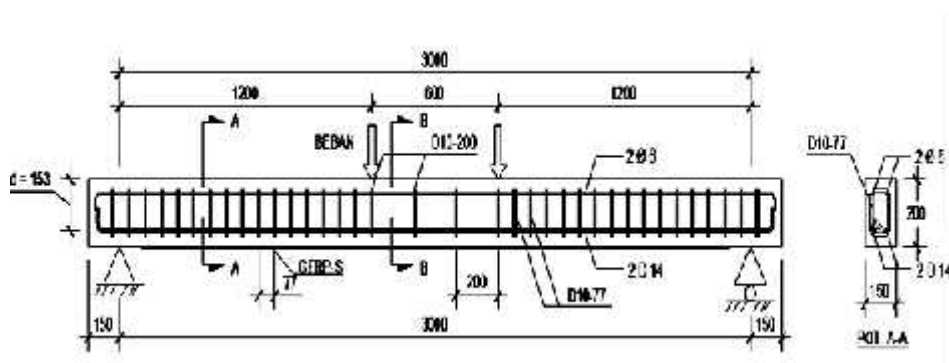
Pengujian lentur balok akan dilakukan pada balok berukuran 150 mm x 200 mm x 3300 mm dengan perkuatan GFRP. Adapun data-data yang akan didapatkan yaitu data regangan beton, regangan baja, besar defleksi yang diperoleh melalui pembacaan data logger.

#### 4. Pengujian Pembebanan Fatik Pada Balok Beton Bertulang

Pengujian ini dilakukan pada benda uji skala penuh (*full scale*) berukuran 150 mm x 200 mm x 3300 mm, dengan memberi pembebanan berulang dengan beban maksimum 24 kN, beban minimum 4 kN dan frekuensi 1.5 Hz. Pembebanan fatik pada pengujian ini mengacu pada ACI 440.2R-08 dimana tegangan tekan beton yang diisyaratkan yaitu sebesar 45%  $f'_c$ . Adapun data-data yang dihasilkan pada pengujian ini yaitu data regangan dan lendutan untuk tiap siklus pembebanan melalui PC oleh rangkaian alat uji strain gauge.

#### 3.2. Desain Penelitian

Benda uji balok ukuran 150 mm x 200 mm x 3300 mm seperti pada gambar 3.1, dibuat sebanyak 4 buah dan dipasang electrical strain gauge pada baja, beton dan GFRP. Pada penelitian ini daerah tarik balok digunakan tulangan  $2\phi 14$  (tegangan leleh = 421.71 MPa), sedangkan untuk tulangan geser digunakan tulangan  $\phi 10-77$  pada 1/3 bentang kiri dan 1/3 bentang kanan, dan bentang tengah  $\phi 10-200$ , kuat tekan rata-rata beton ( $f'_c$ ) = 25 MPa. Desain balok sebagai berikut



Gambar 3.1 Profil memanjang dan melintang benda uji



### 3.3. Variabel Benda Uji

Untuk memudahkan dalam mengidentifikasi hasil pengujian maka setiap benda uji diberikan simbol yang berbeda-beda. **Tabel 3.1** menunjukkan rincian simbol-simbol yang digunakan untuk setiap benda uji. Sebagai contoh, misalnya simbol BF<sub>6</sub> menunjukkan bahwa benda uji diuji secara fatik. Nomor 6 menunjukkan bahwa balok direndam selama 6 bulan.

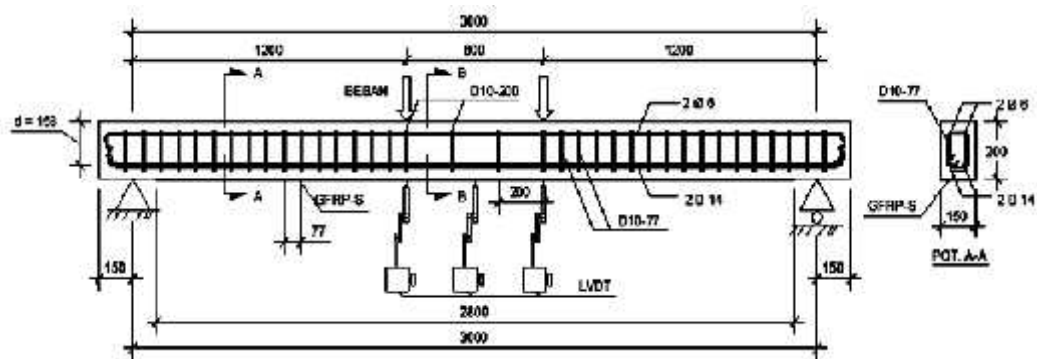
**Tabel 3.1** Variabel Benda Uji

Nomor	Kode benda uji	Jenis Pengujian	Lama perendaman	Jumlah
1	BF 0	Fatik	0	1
2	BF 1	Fatik	1 bulan	1
3	BF 6	Fatik	6 bulan	1
<b>Total =</b>				<b>3</b>

### 3.4. Set Up Pengujian

Set Up pengujian seperti terlihat pada Gambar 3.2, benda uji ditempatkan pada loading frame dan tumpuan dikondisikan sendi – rol pada kedua ujungnya. Pembebanan dilakukan di dua titik secara simetris dengan jarak 600 mm antar titik pembebanan dan sejauh 1200 mm dari masing-masing tumpuan. Pembebanan dilakukan dengan bantuan *hidraulick jack* dan *load cell*. Untuk mengetahui defleksi yang terjadi maka pada balok uji dipasang tiga buah LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*). Satu buah ditempatkan pada tengah bentang dan dua buah di bawah masing-masing beban.

Untuk mengukur regangan beton dipasang *strain gauge* pada sisi tekan terluar balok (C u) pada daerah atas, 5 cm dibawah badan benda uji (C 1), dan 10 cm dibawah benda uji (C 2). Sedangkan untuk mengukur regangan tarik maka dipasang *strain gauge* pada tulangan. Data pertambahan beban, defleksi, dan regangan tercatat melalui *data logger*. Pembebanann akan dihentikan jika benda uji sudah runtuh dan data logger yang membaca besarnya beban dari *load cell* tidak bertambah.



Gambar 3.2 Set up pengujian

### 3.5. Bagan Alir Penelitian



Gambar 3.3 Kerangka Prosedur Penelitian

### **3.6. Lokasi dan Waktu Penelitian**

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Lama penelitian direncanakan selama 6 bulan.

### **3.7. Alat dan Bahan Penelitian**

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a) Hydraulic power supply.
- b) Frame max load dynamic  $\pm 1000$  KN.
- c) Computerized fatigue test machine.
- d) Personal computer system.
- e) LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*).
- f) Magnetic static.
- g) Strain Gauge untuk baja dan beton.
- h) Data Logger TDS-530.
- i) Alat tulis menulis.
- a) Lem CNN dan CNI



Gambar 3.4 Alat Pi Gauge



Gambar 3.5 Alat LVDT



Gambar 3.6 Alat Load Cell

### **3.8. Prosedur Pemasangan GFRP**

Sampel balok penelitian diperbaiki, bagian permukaan balok yang akan diperkuat dibersihkan, dan dipersiapkan sebelum pemasangan GFRP, dengan urutan sebagai berikut:

1. Menyediakan segala bahandan peralatan yang diperlukan,
2. Mengatur posisi balok sedemikian rupa sehingga memungkinkan untuk memasang GFRP,
3. Meratakan permukaan balok yang akan diperkuat dengan GFRP menggunakan gurinda serta membersihkannya dari segala kotoran,
4. Memastikan permukaan beton dalam keadaan kering agar epoxy resin melekat baik,
5. Memotong lembaran TyfoBH sesuai ukuran permukaan dasar balok,
6. Mempersiapkan campuran bahan perekat Tyfo S komponen A dan komponen B dengan perbandingan volume 2: 1. Mengaduk campuran yang telah ditakar dengan catatan proses pengadukan tidak boleh berlebihan hingga menghasilkan busa dan gelembung yang bisa terperangkap sebagai rongga udara dalam perekat,
7. Melapisi permukaan lantai dengan plastik agar campuran yang menetes tidak mengotori lantai laboratorium,
8. Mengoleskan bahan perekat pada permukaan dasar balok dan pada lembaran Tyfo BC,

9. Menempelkan bahan perkuatan yang telah dipotong dan diberi perekat dengan arah longitudinal balok dan ditekan perlahan terhadap perekat yang masih basah. Rongga udara yang terjebak antara lapisan perkuatan dengan permukaan beton akan dilepas dengan tekanan roller searah serat perkuatan agar perekat menyatu dengan serat dan permukaan beton. Penekanan roller tegak lurus arah serat tidak diperbolehkan karena dapat mengubah arah serat atau merusak serat,
10. Mengoleskan perekat tahap kedua diatas permukaan TyfoBC yang sudah dilekatkan seluruhnya untuk menjamin lekatan serat kepermukaan beton, beton ditekan dengan roller agar bahan perekat dapat melapis secara merata ke permukaan TyfoBC,
11. Mendingkan benda uji minimal selama 3 x 24 jam sebelum dilakukan pengujian.

## BAB IV

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Karakteristik Bahan

##### 4.1.1. Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian tarik baja tulangan dilakukan di Laboratorium Laboratorium Bahan dan Struktur Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Hasil pemeriksaan kuat tarik baja tulangan dapat dilihat pada tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Hasil pengujian tarik baja tulangan

Diameter Sampel	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$E_s$ (GPa)
6	240.45	417.2	150,220
10	410.24	611.57	209,462
14	421.71	671.29	219,771

*Sumber : Hasil olahan data*

##### 4.1.2. Hasil pengujian karakteristik beton

Pengambilan sampel dilakukan sesuai dengan pengecoran balok uji. Sampel yang diuji berupa silinder beton 10 cm x 20 cm dan balok dengan dimensi 10 x 10 x 40 cm yang dibuat pada saat pengecoran balok beton bertulang sebagai sampel kontrol (*control specimen*). Pada pengecoran balok, jumlah sampel silinder yang dibuat sebanyak 12 buah silinder untuk pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas 3 buah, dan 3 buah balok 10 x 10 x 40 cm untuk pengujian lentur.



Pengujian material beton terdiri dari pengujian kuat tekan, modulus elastisitas dan pengujian kuat lentur. Pengujian material beton balok uji menggunakan mesin *Tokyo Testing Machine (TTM)*. Pengetesan material beton dilakukan setelah benda uji mencapai umur 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan, kuat lentur dan modulus elastisitas beton disajikan dalam Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Karakteristik beton

NO	Uraian	Karakteristik Beton Umur 28 Hari (Mpa)		Modulus Elastisitas (Mpa)
		Tekan	Lentur	
1	Balok Beton Bertulang	25	3.34	24158.1

*Sumber : Hasil olahan data*



Gambar 4.1 Pengujian kuat tarik dan kuat lentur

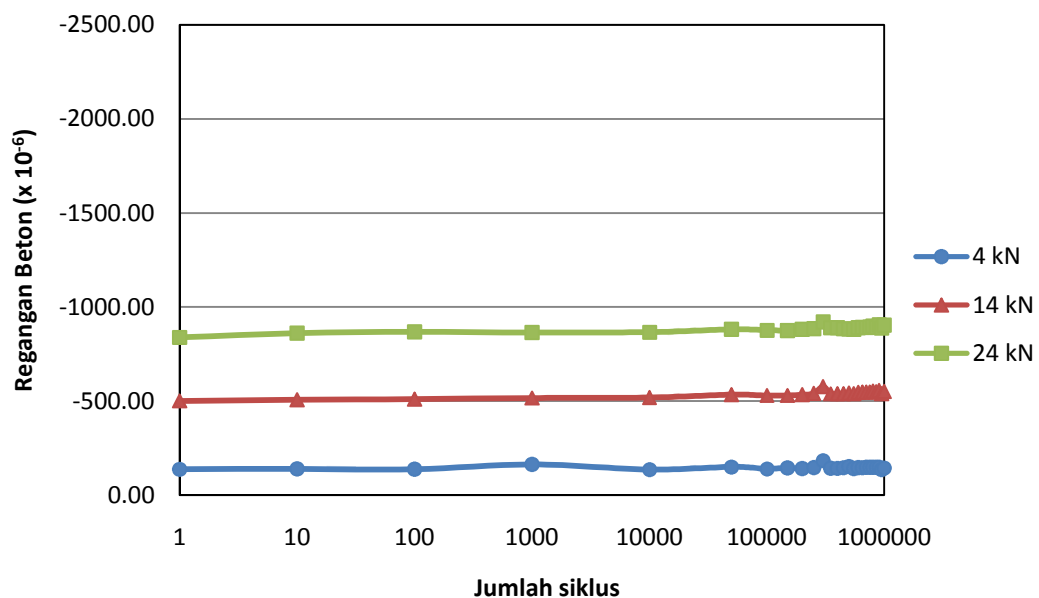
#### **4.2. Pengujian Balok Beton Bertulang Dengan Pembebanan Fatik**

Pengujian balok beton bertulang dengan pembebanan fatik bertujuan untuk mengetahui kemampuan balok dalam menerima pembebanan berulang. Pengujian ini dilakukan dengan pemberian beban berulang dengan frekuensi 1.5 Hz dan jumlah siklus 1.000.000 kali.

#### 4.2.1. Pengujian Balok BF0

Balok BF0 adalah balok dengan perkuatan GFRP pada bagian bawah tanpa perendaman. Pengujian dilakukan dengan pemberian beban berulang dengan beban maksimum 24 kN, beban minimum 4 kN dan frekuensi 1.5 Hz. Dari hasil pengujian balok BF2 mengalami kegagalan pada siklus 1.200.000 kali.

##### a. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan Beton

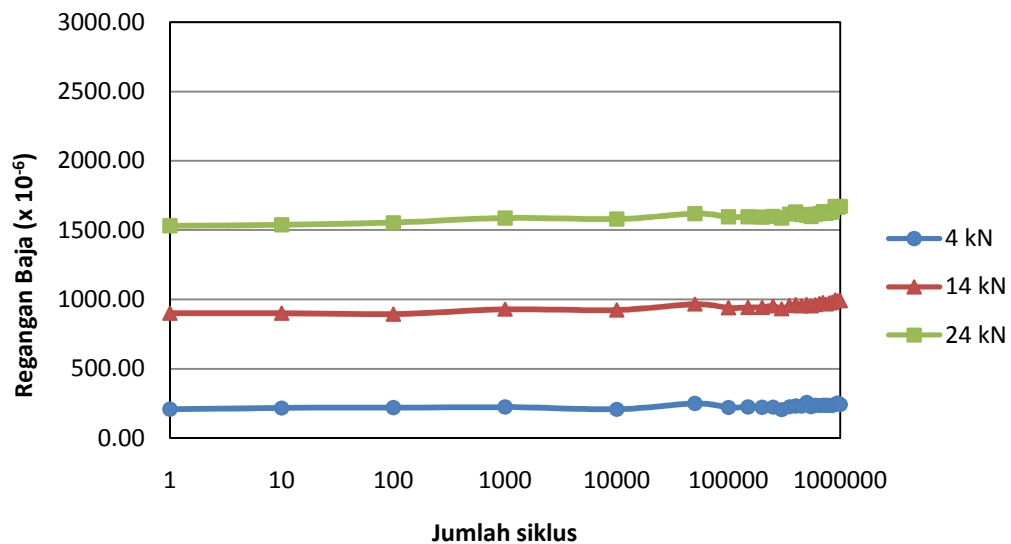


Gambar 4.2 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan beton

Dari gambar 4.2 diketahui bahwa seiring dengan penambahan jumlah siklus pembebanan fatik maka regangan beton akan semakin besar meskipun beban yang diberikan tetap. Pada siklus 10.000 nilai regangan beton Cu sebesar 866.93  $\mu$ , siklus 500.000 nilai regangan beton Cu sebesar 883.18  $\mu$  dengan beban yang sama yaitu 24 kN. Seiring dengan penambahan jumlah siklus pembebanan maka regangan beton juga semakin besar yaitu 903.17  $\mu$  pada siklus 1.000.000 dengan beban yang sama. Hal ini menandakan bahwa balok mengalami kelelahan.

Pembebanan terus dilakukan hingga akhirnya balok mengalami kegagalan pada siklus 1.200.000 kali dengan regangan Cu 902  $\mu$ .

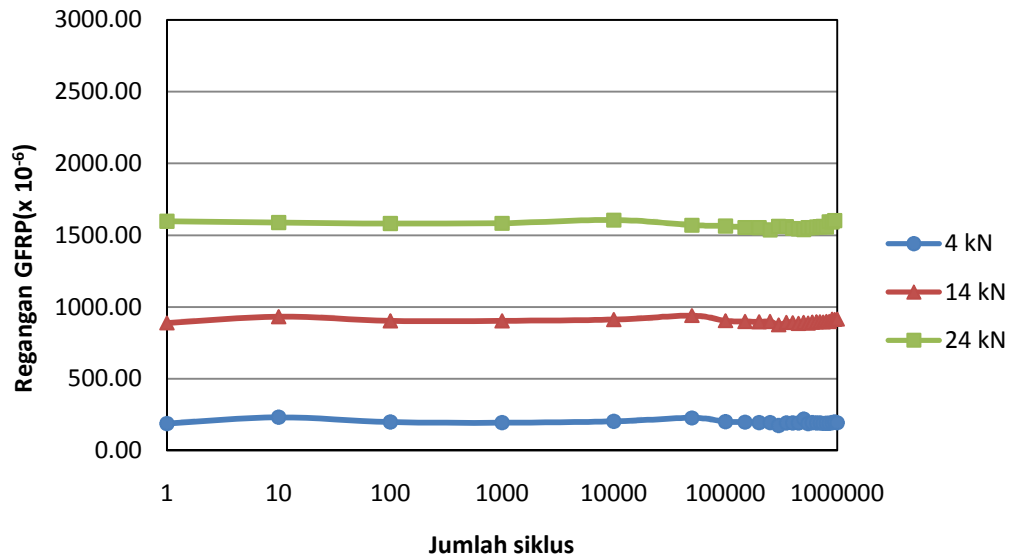
#### b. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan Baja



Gambar 4.3 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan baja

Dari gambar 4.3 diketahui bahwa dengan pembebanan yang tetap yaitu 24 kN dan 4 kN tetapi dengan jumlah siklus terus meningkat maka regangan baja akan semakin besar. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN nilai regangan baja sebesar 1579.65  $\mu$ , siklus 500.000 nilai regangan baja sebesar 1606.01  $\mu$ , dengan beban yang sama tetapi jumlah siklus yang berbeda yaitu 1.000.000 nilai regangan menjadi 1672.18  $\mu$ . Pembebanan terus dilakukan hingga akhirnya baja tulangan putus pada siklus 1.250.000 kali.

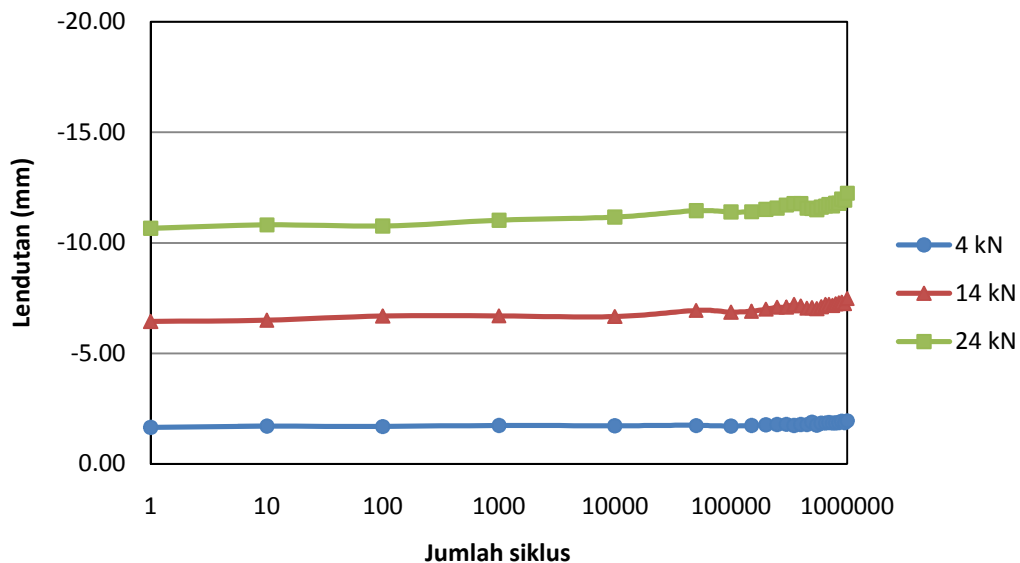
### c. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan GFRP



Gambar 4.4 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan GFRP

Hubungan siklus pembebanan fatik dengan regangan GFRP seperti terlihat pada gambar 4.4 cenderung membentuk garis lurus pada awal siklus pembebanan. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN nilai regangan GFRP sebesar 1584.43  $\mu$ , siklus 500.000 nilai regangan GFRP menurun menjadi 1543.21  $\mu$ . Dengan beban yang sama, pada siklus 1.000.000 nilai regangan GFRP kembali mengalami peningkatan menjadi 1600.51  $\mu$ , sehingga dapat dikatakan bahwa peningkatan jumlah siklus pembebanan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai regangan GFRP. Hal ini menandakan bahwa material GFRP memiliki ketahanan yang besar dalam menerima pembebanan berulang.

#### d. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Lendutan



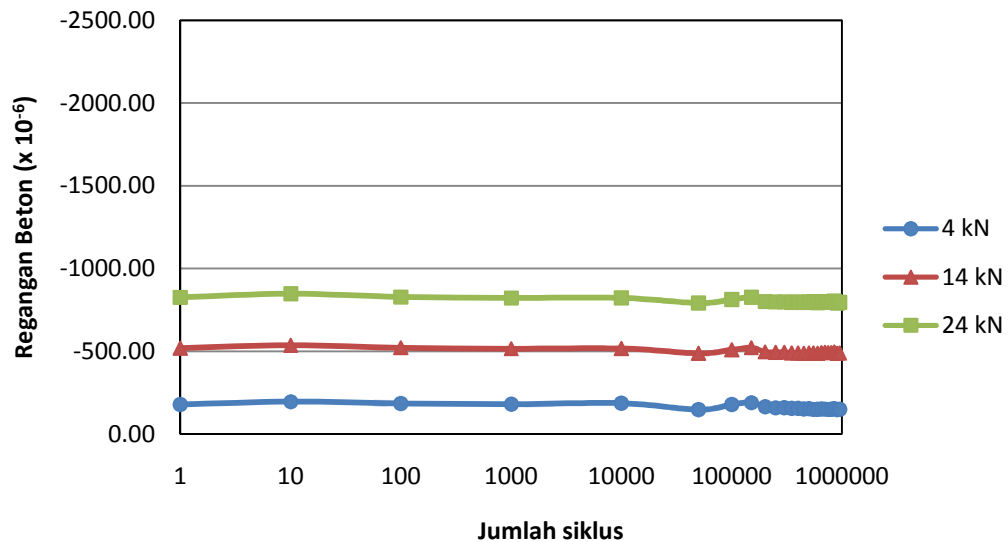
Gambar 4.5 Grafik hubungan siklus pembebanan dan lendutan

Dari gambar 4.5 diketahui bahwa lendutan akan semakin besar seiring dengan peningkatan jumlah siklus pembebanan meskipun beban yang diberikan tetap. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN terjadi lendutan sebesar 11.16 mm dan pada siklus 500.000 terjadi lendutan sebesar 11.55 mm. Dengan beban yang sama tetapi jumlah siklus yang berbeda yaitu 1.000.000 lendutan menjadi 12.26 mm. Hal ini menunjukkan bahwa balok mengalami kelelahan dalam menerima beban berulang.

#### 4.2.2. Pengujian Balok BF1

Balok BF3 adalah balok dengan perkuatan GFRP pada bagian bawah dengan perendaman selama 1 bulan. Pengujian dilakukan dengan pemberian beban berulang dengan beban maksimum 24 kN, beban minimum 4 kN dan frekuensi 1.5 Hz. Dari hasil pengujian balok BF3 mengalami kegagalan pada siklus 1.000.000 kali.

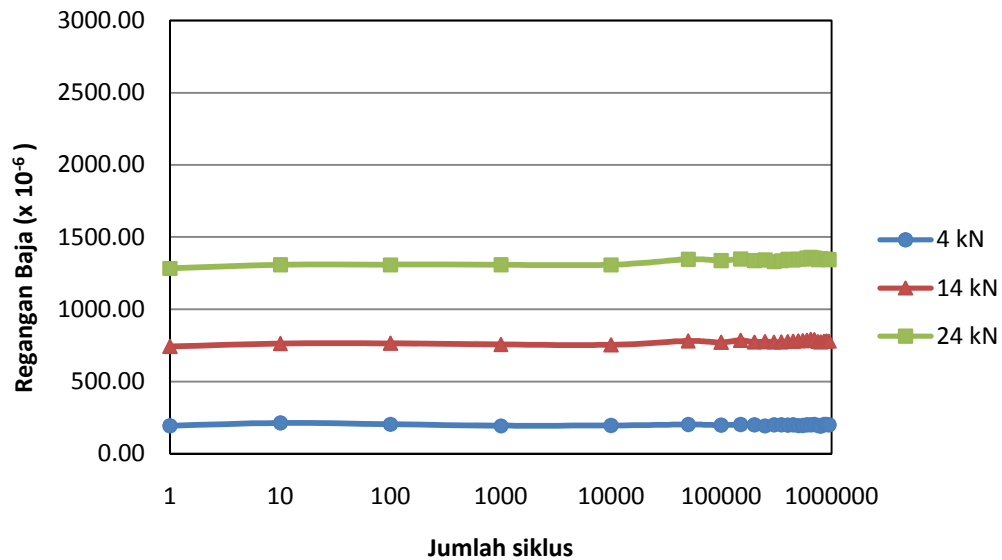
### a. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan Beton



Gambar 4.6 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan beton

Hubungan siklus pembebanan fatik dengan regangan beton seperti terlihat pada gambar 4.6 cenderung lebih linear pada awal siklus pembebanan. Namun seiring dengan peningkatan jumlah siklus pembebanan kurva cenderung menurun yang menandakan bahwa regangan beton semakin kecil. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 KN nilai regangan beton Cu sebesar 822.75  $\mu$ , pada siklus 500.000 nilai regangan beton sebesar 794.22  $\mu$ . Dengan beban yang sama, pada siklus 1.000.000 nilai regangan beton Cu sebesar 795.00  $\mu$ .

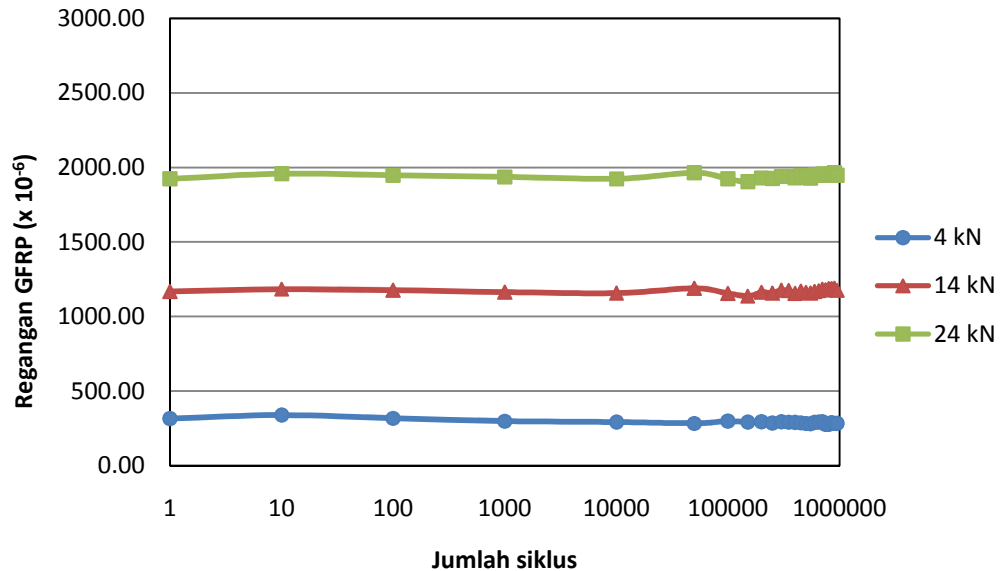
### b. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan Baja



Gambar 4.7 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan baja

Dari gambar 4.7 diketahui bahwa dengan pembebanan yang tetap yaitu 24 kN dan 4 kN tetapi dengan jumlah siklus terus meningkat maka regangan baja akan semakin besar. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN nilai regangan baja sebesar 1308.18  $\mu$ , pada siklus 500.000 nilai regangan baja sebesar 1342.08  $\mu$ , dengan beban yang sama tetapi jumlah siklus yang berbeda yaitu 1.000.000 nilai regangan menjadi 1342.88  $\mu$ . Setelah mencapai siklus 1.000.000 balok beton bertulang dibebani secara statik hingga hancur.

### c. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan GFRP

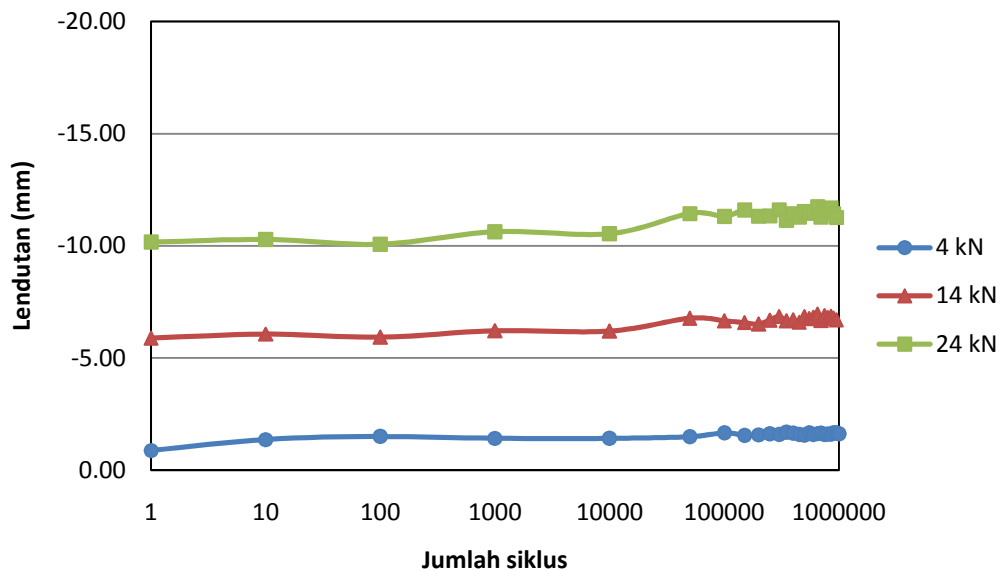


Gambar 4.8 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan GFRP

Hubungan siklus pembebanan fatik dengan regangan GFRP seperti terlihat pada gambar 4.8 cenderung membentuk garis lurus yang menandakan bahwa peningkatan jumlah siklus pembebanan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai regangan GFRP. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN nilai regangan GFRP sebesar 1937.27  $\mu$ , dan pada siklus 500.000 nilai regangan GFRP sebesar 1944.62  $\mu$ . Dengan beban yang sama, pada siklus 1.000.000 nilai regangan GFRP sebesar 1946.77  $\mu$ , sehingga dapat dikatakan bahwa peningkatan jumlah siklus pembebanan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai regangan GFRP. Hal ini menandakan bahwa material GFRP memiliki ketahanan dalam menerima pembebanan berulang.



#### d. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Lendutan



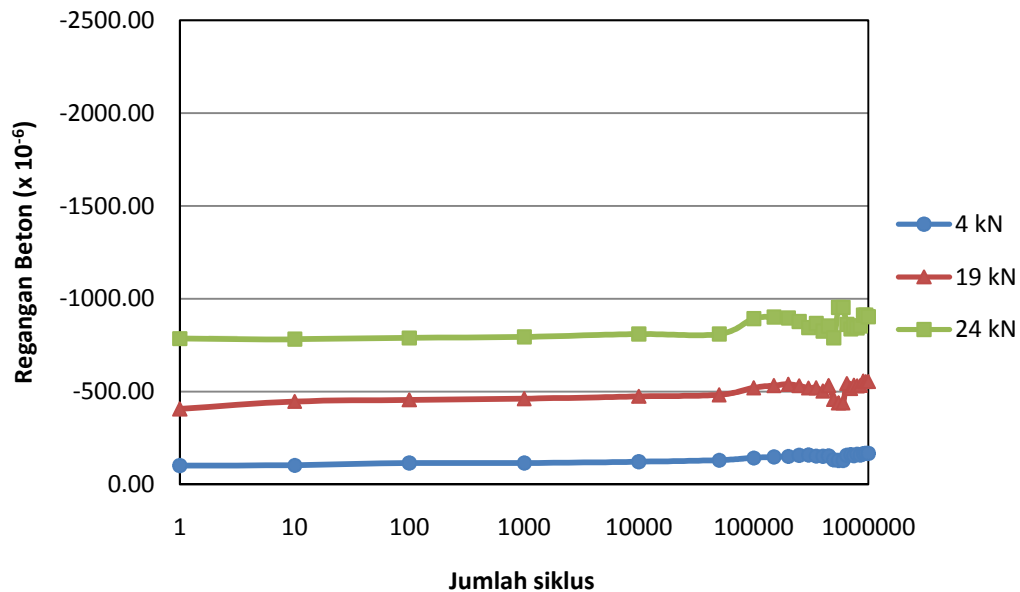
Gambar 4.9 Grafik hubungan siklus pembebanan dan lendutan

Dari gambar 4.9 diketahui bahwa lendutan akan semakin besar seiring dengan peningkatan jumlah siklus pembebanan meskipun beban yang diberikan tetap. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 KN terjadi lendutan sebesar 10.63 mm. Dengan beban yang sama tetapi jumlah siklus yang berbeda yaitu 500.000 terjadi lendutan sebesar 11.29 mm dan pada siklus 1.000.000 terjadi lendutan sebesar 11.28 mm. Hal ini menunjukkan bahwa balok mengalami kelelahan dalam menerima beban berulang.

#### 4.2.3. Pengujian Balok BF6

Balok BF6 adalah balok dengan perkuatan GFRP pada bagian bawah dengan perendaman selama 6 bulan. Pengujian dilakukan dengan pemberian beban berulang dengan beban maksimum 24 kN, beban minimum 4 kN dan frekuensi 1.5 Hz. Dari hasil pengujian balok BF4 mengalami kegagalan pada siklus 1.000.000 kali.

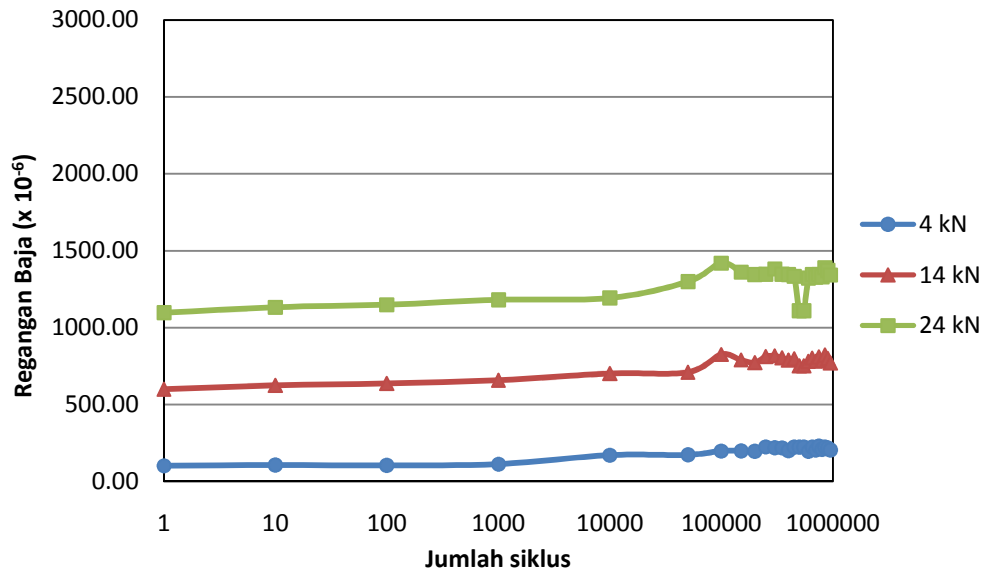
### a. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan Beton



Gambar 4.10 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan beton

Dari gambar 4.10 diketahui bahwa seiring dengan penambahan jumlah siklus pembebanan fatik maka regangan beton akan semakin besar meskipun beban yang diberikan tetap. Pada siklus 10.000 nilai regangan beton Cu sebesar  $809.50 \mu$  dengan beban maksimum 24 kN dan pada siklus 500.000 nilai regangan beton Cu sebesar  $789.50 \mu$ . Seiring dengan penambahan jumlah siklus pembebanan maka regangan beton juga semakin besar yaitu sebesar  $903.26 \mu$  pada siklus 1.000.000 dengan beban yang sama. Setelah mencapai siklus 1.000.000 balok beton bertulang dibebani secara statik hingga hancur.

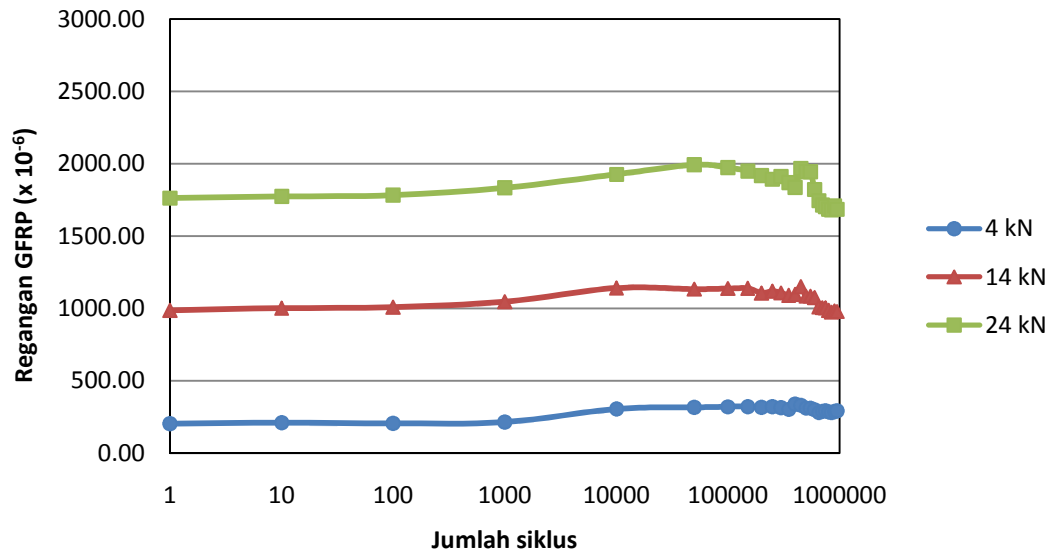
### b. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan Baja



Gambar 4.11 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan baja

Dari gambar 4.11 diketahui bahwa dengan pembebanan yang tetap yaitu 24 kN dan 4 kN tetapi dengan jumlah siklus terus meningkat maka regangan baja akan semakin besar. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN nilai regangan baja sebesar 1180.02  $\mu$  dan pada siklus 500.000 nilai regangan baja sebesar 1334.19  $\mu$ . Dengan beban yang sama tetapi jumlah siklus yang berbeda yaitu 1.000.000 nilai regangan baja menjadi 1342.92  $\mu$ . Setelah mencapai siklus 1.000.000 balok beton bertulang dibebani secara statik hingga hancur.

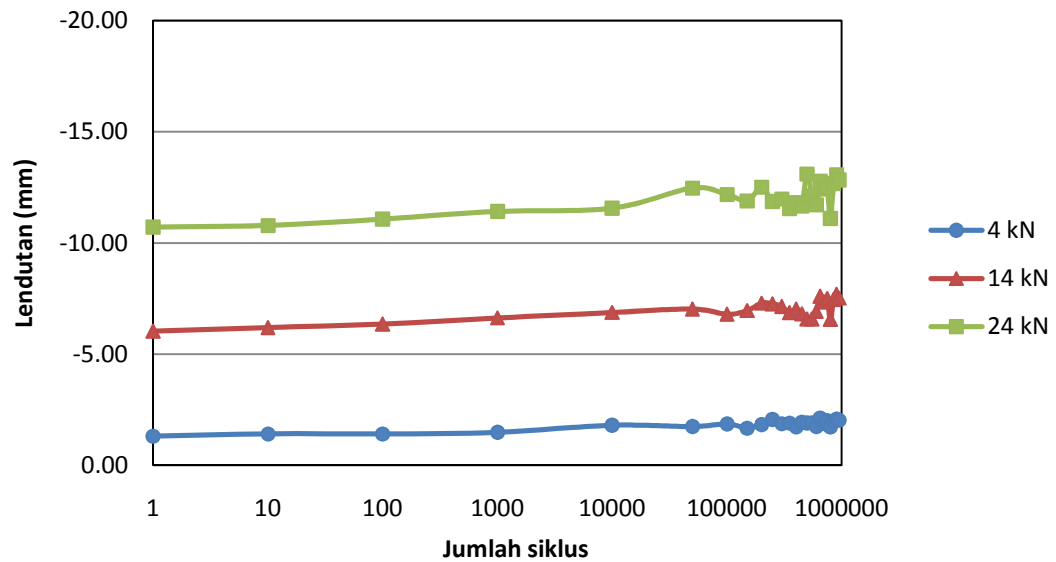
### c. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Regangan GFRP



Gambar 4.12 Grafik hubungan siklus pembebanan dan regangan GFRP

Hubungan siklus pembebanan fatik dengan regangan GFRP seperti terlihat pada gambar 4.12 menunjukkan terjadinya peningkatan nilai regangan GFRP mulai dari siklus 10 hingga siklus 600.000, namun pada siklus 650.000 hingga siklus 1.000.000 nilai regangan GFRP cenderung menurun sehingga pada grafik terlihat adanya penurunan. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN nilai regangan GFRP sebesar 1832.70  $\mu$  dan pada siklus 500.000 nilai regangan GFRP sebesar 1966.31  $\mu$ . Dengan beban yang sama, pada siklus 1.000.000 regangan GFRP sebesar 1686.51  $\mu$ .

#### d. Hubungan Siklus Pembebanan Fatik dan Lendutan



Gambar 4.13 Grafik hubungan siklus pembebanan dan lendutan

Dari gambar 4.13 diketahui bahwa lendutan akan semakin besar seiring dengan peningkatan jumlah siklus pembebanan meskipun beban yang diberikan tetap. Pada siklus 10.000 dengan beban maksimum 24 kN terjadi lendutan sebesar 11.41 mm dan pada siklus 500.000 terjadi lendutan sebesar 11.67 mm. Dengan beban yang sama tetapi jumlah siklus yang berbeda yaitu 1.000.000 lendutan menjadi 12.83 mm. Hal ini menunjukkan bahwa balok mengalami kelelahan dalam menerima beban berulang.

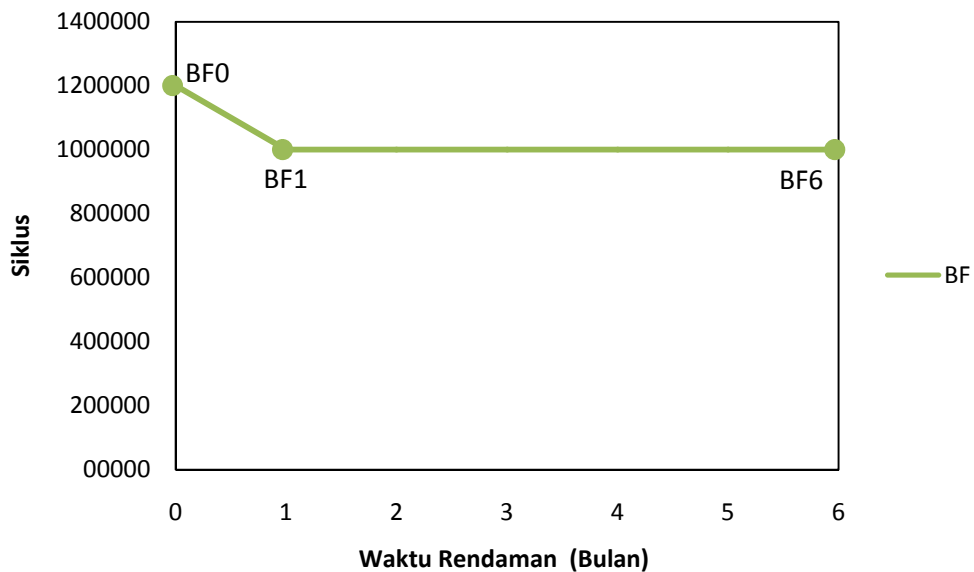
#### 4.3. Kapasitas Lentur Balok

Tabel 4.3 menunjukkan data beban dan momen ultimit yang terjadi pada balok dengan pengujian statik dan fatik. Dari pengujian statik diketahui beban ultimit  $P_u$  untuk untuk balok rendaman 1 bulan sebesar 45.02 kN dengan  $M_u$  sebesar 28.7952 kNm. Sedangkan untuk balok rendaman 6 bulan beban ultimit  $P_u$  sebesar 39.48 kN dengan  $M_u$  sebesar 25.4724 kNm. Pada balok rendaman 6 bulan terjadi penurunan kapasitas momen sebesar 3.3228 kNm atau 11.53% dari balok rendaman 1 bulan.

**Tabel 4.3** Beban dan momen ultimit balok

NO	WAKTU RENDAMAN	BALOK	PENGUJIAN STATIK		PENGUJIAN FATIK		JUMLAH SIKLUS
			$P_u$ (kN)	$M_u$ (kN m)	$P_u$ (kN)	$M_u$ (kN m)	
1	0 BULAN	BFO	-	-	24	16.182	1.200.000
2	1 BULAN	BF1	45.02	28.7952	24	16.182	1.000.000
3	6 BULAN	BF6	39.48	25.4724	24	16.182	1.000.000

Dari pengujian fatik diketahui beban maksimum untuk balok rendaman 0 bulan, 1 bulan dan 6 bulan sebesar 24 kN dengan  $M_u$  sebesar 16.182 kNm. Balok rendaman 0 bulan mengalami kegagalan pada siklus 1.200.000. Sedangkan untuk balok rendaman 1 bulan dan 6 bulan pembebanan dilakukan hingga siklus 1.000.000 kemudian diuji statik hingga hancur. Adapun pengaruh waktu rendaman terhadap siklus kegagalan dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Pengaruh waktu rendaman terhadap siklus kegagalan

Dari gambar 4.14 diketahui bahwa terjadi penurunan jumlah siklus kegagalan pada balok rendaman 1 bulan dan 6 bulan dibandingkan dengan balok rendaman 0 bulan. Sedangkan untuk balok rendaman 1 bulan dan 6 bulan jumlah siklus kegagalannya sama namun seperti dijelaskan sebelumnya bahwa terjadi penurunan kapasitas momen sebesar 11.53 %. Hal ini disebabkan menurunnya kapasitas rekatan antara balok dan GFRP akibat redaman air laut. Penurunan kapasitas rekatan menyebabkan proses debonding akan lebih cepat terjadi dan balok akan mengalami kegagalan.

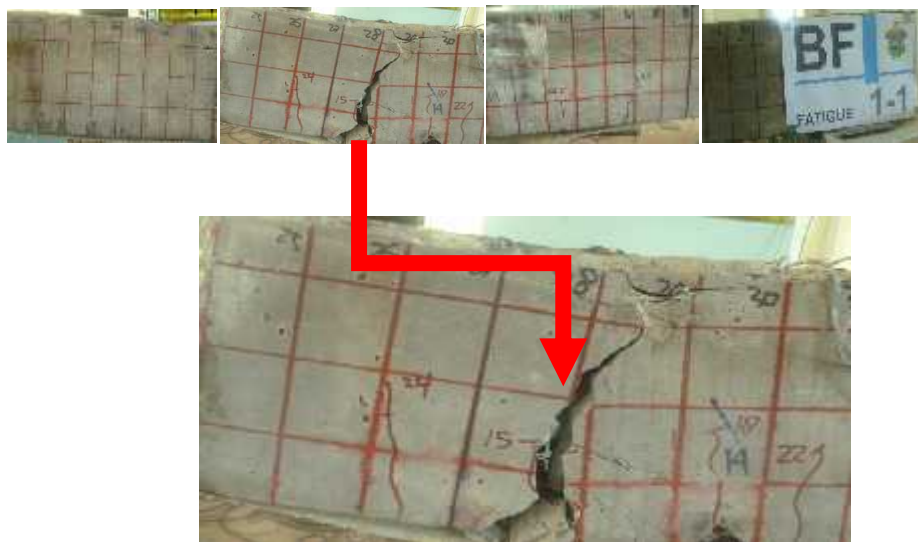
#### 4.4. Pola Keretakan

Pengamatan pola retak dilakukan terhadap benda uji pada saat beban retak pertama sampai beban retak maksimum. Menurut Mccromac (2001), retak lentur adalah retak vertical yang memanjang dari sisi tarik dan mengarah keatas sampai daerah sumbu netral. Pola retak yang terjadi pada semua benda uji pada pengujian ini adalah retak lentur,hal ini dilihat dngan adanya retak-retak yang arah

rambatannya vertical dari sisi tarik menuju ke garis netral balok seperti terlihat pada semua gambar pola retak.



Gambar 4.15 Pola retak balok rendaman 0 bulan



Gambar 4.16 Pola retak balok rendaman 1 bulan





Gambar 4.17 Pola retak balok rendaman 6 bulan

Dari gambar 4.15 sampai gambar 4.17 diketahui bahwa seiring peningkatan jumlah siklus pembebanan maka terjadi perambatan retak dari daerah tarik balok menuju garis netral balok serta munculnya retakan-retakan baru. Pada sisi tarik balok terjadi retakan yang cukup besar yang merambat hingga sisi tekan. Hal ini diakibatkan oleh pembebanan berulang yang menyebabkan terjadinya pelebaran retak dari sisi tarik balok tersebut. Kegagalan balok ditandai dengan terjadinya debonding dan putusya tulangan tarik.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari hasil penelitian pada benda uji balok beton bertulang dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pemberian beban fatik pada balok beton bertulang menyebabkan terjadinya penurunan kapasitas lentur, hal ini dapat dilihat dari meningkatnya nilai regangan beton, regangan baja dan regangan GFRP seiring dengan penambahan jumlah siklus pembebanan.
2. Rendaman air laut menyebabkan terjadinya penurunan kapasitas lentur balok, hal ini dapat dilihat dari menurunnya momen kapasitas yang terjadi pada balok dengan waktu rendaman yang lebih lama. Untuk balok dengan rendaman 1 bulan  $M_u$  sebesar 28.7952 kNm ,sedangkan balok dengan rendaman 6 bulan  $M_u$  sebesar 25.4724 kNm. Terjadi penurunan momen kapasitas sebesar 3.3228 kNm atau 11.53%.

#### **5.2 .Saran**

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan frekuensi dan jumlah siklus yang disesuaikan dengan kondisi di lapangan pada umumnya sehingga dapat dilakukan analisa pada perencanaan struktur dengan kondisi pembebanan fatik.
2. Penelitian harusnya dilakukan dengan jumlah tim yang lebih banyak mengingat pelaksanaan pengujian fatik memerlukan tenaga dan waktu yang cukup besar.

## DAFTAR PUSTAKA

- ACI.Committee 440.2R-08, 2008.*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute. U.S.A
- Alami Fikri, 2010. *Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)*. Seminar dan Pameran HAKI, Jakarta
- Suardana, I Ketut dan Widiarsa, Ida B G,2008.*Perilaku Runtuh Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat Lapis Glass Fibre Rainforced Polymer*. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil.
- Duhri, Aswin Perdana, 2013. *Studi Pengaruh Sabuk Gfrp Diagonal Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang*. Skripsi Strata satu Universitas Hasanuddin, Makassar.
- MR, Fatriady, 2013. *Studi Pengaruh Beban Fatik Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan Glass Fibre Rainforced Polymer Sheet*. Tesis, Program Magister Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Fabeno, Eko Dwinorman, 2013. *Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Glass Fibre Rainforced Polymer (GFRP) Pasca Leleh*, Skripsi, Program Sarjana Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Setiawan, Wawan, 2013. *Pengaruh Beban Fatik Terhadap Kapasitas Balok Beton Bertulang*, Skripsi, Program Sarjana Universitas Hasanuddin, Makassar.

# LAMPIRAN

# DOKUMENTASI KEGIATAN



Persiapan Bekisting Benda Uji



Pemasangan Strain Gauge Baja



Pengecoran Balok Uji



Pengambilan Sampel Beton



Pembuatan Kolam Perendaman



Proses Curing Beton





Proses Gurinda Beton Sebelum Pemasangan GFRP



Proses Pemasangan GFRP



Pengangkatan Balok ke Dalam Kolam Perendaman



Posisi Balok Dalam Kolam Perendaman

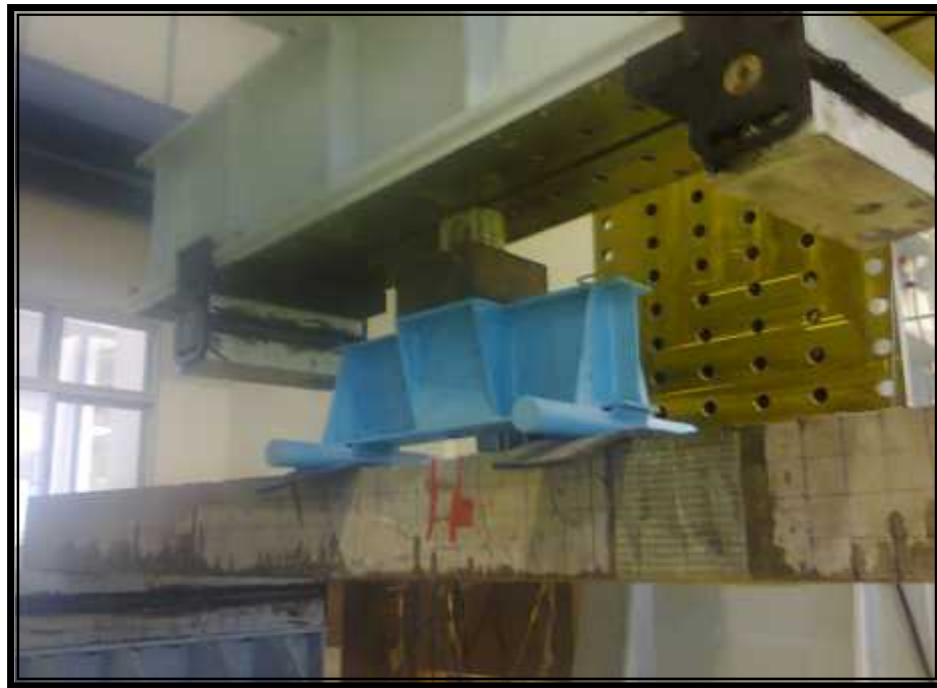


Pengisian Kolam Dengan Air Laut



Persiapan Pengujian Fatik





Pengujian Fatik



Pola Kegagalan Pembebanan Fatik

